



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA GRÍCOLA
CAMPINA GRANDE – PARAÍBA**



**COMPORTAMENTO E NECESSIDADES HÍDRICAS DO GERGELIM SOB
DIFERENTES REGIMES DE IRRIGAÇÃO**

JOSÉ RODRIGUES PEREIRA

**CAMPINA GRANDE – PARAÍBA
DEZEMBRO – 2014**

JOSÉ RODRIGUES PEREIRA

**COMPORTAMENTO E NECESSIDADES HÍDRICAS DO GERGELIM SOB
DIFERENTES REGIMES DE IRRIGAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Campina Grande como parte das exigências
do Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título de Doutor
em Engenharia Agrícola.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:

ENGENHARIA DE ÁGUA E SOLO

ORIENTADORES:

Prof. PhD. HUGO ORLANDO CARVALLO GUERRA - UFCG/CTRN/UAEAg

Pesq. Dr. JOSÉ RENATO CORTEZ BEZERRA – Embrapa Algodão

**CAMPINA GRANDE – PARAÍBA
DEZEMBRO - 2014**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- P436c Pereira, José Rodrigues.
Comportamento e necessidades hídricas do gergelim sob diferentes regimes de irrigação / José Rodrigues Pereira. – Campina Grande, 2014.
88 f.: il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2014.
- "Orientação: Prof. Dr. Hugo Orlando Carvalho Guerra, Pesq. Dr. José Renato Cortez Bezerra".
Referências.
1. *Sesamum indicum L.*(Gergelim). 2. Fluxos de Água. 3. Consumo de Água. 4. Taxas de Crescimento. 5. Rendimento. I. Guerra, Hugo Orlando Carvalho. II. Bezerra, José Renato Cortez. III. Título.

CDU 631.413.3(043)



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

JOSÉ RODRIGUES PEREIRA

COMPORTAMENTO E NECESSIDADES HÍDRICAS DO GERGELIM SOB
DIFERENTES REGIMES DE IRRIGAÇÃO


BANCA EXAMINADORA

PARECER



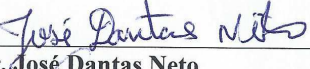
PhD. Hugo Orlando Carvalho Guerra
Orientador - UAEA/UFCC

Aprovado




Dr. José Renato Cortez Bezerra
Orientador - EMBRAPA

APROVADO



Dr. José Dantas Neto
Examinador - UAEA/UFCC

APROVADO



Dr. João Henrique Zonta
Examinador - EMBRAPA

APROVADO



Dr. Marcos Eric Barbosa Brito
Examinador - CCTA/UFCC

APROVADO



Dr. Jorge Alves de Sousa
Examinador - CES/UFCC

APROVADO

DEZEMBRO DE 2014

COM MUITO AMOR E CARINHO, DEDICO ESTE TRABALHO.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, que me angariou pelo dom concedido, o que me tornou capaz de chegar ao final desta etapa.

Aos grandes mestres e instrutores, que tiveram a paciência de me transmitir seus conhecimentos no decorrer dos anos de estudo.

Ao professor PhD. Hugo Orlando Carvalho Guerra, pela orientação, apoio e paciência que, sem dúvida contribuiu muito em prol da minha jornada acadêmica e profissional.

Ao pesquisador Dr. José Renato Cortez Bezerra, pela orientação para operacionalização do experimento a campo e para redação final da presente Tese.

À Embrapa Algodão, pela cessão de infraestrutura física em convênio com a UFCG, Campina Grande, PB, possibilitando a realização do experimento em Barbalha, CE, em especial aos pesquisadores Dr. Tarcísio Marcos de Souza Gondim e Dr. João Henrique Zonta, aos analistas M. Sc. Gildo Pereira Araújo e Luiz Veras, ao assistente de pesquisa M. Sc. Ramon Araújo de Vasconcelos e aos auxiliares de pesquisa Célio Santos Abdala, Everaldo Patrício de Lima e Carlos Antônio.

Aos estagiários da Embrapa Algodão/UFCG, Campina Grande, PB, da Embrapa Algodão/UFPB, Areia, PB, e da Embrapa Algodão/UEPB, Whéllyson Pereira Araújo, Franciezer Vicente de Lima, Valdeilson Lemos Araújo, Érica Samara Araújo Barbosa de Almeida, Genelício Carvalho e Francisco Alexandria Júnior, pelo auxílio nas medições periódicas de plantas.

Aos estagiários Embrapa Algodão/CENTEC, Juazeiro do Norte, CE, Ítalo, Michele Pinheiro, Felipe Lima e Edicarlos Roberto, pelas medições diárias do conteúdo de água do solo.

À COPEAG/UFCG, apoiada pela Capes, pela pronta disponibilidade financeira para a realização do experimento na Embrapa Algodão em Barbalha, CE.

Aos participantes da Banca Examinadora de minha Tese, que se dispuseram a contribuir para a melhoria do trabalho final.

A MARIA IRANY PAULO RODRIGUES, minha Esposa, que tem sido minha força e base de sustentação: Obrigado pelo carinho, companheirismo, compreensão e amor.

A nossos Filhos, Francielle Marie Paulo Rodrigues e Iesus Paulo Rodrigues, pela presença carinhosa em nossas vidas.

A toda minha família, em especial a meus Pais: Francisco Rodrigues dos Santos e Arlete Pereira dos Santos, pelo amor, carinho e incentivo durante todo o processo de minha aprendizagem e acúmulo de conhecimentos.

A minhas Irmãs: Francicléia Rodrigues Moreira, Maria da Conceição Rodrigues Alves (In memorian), Francicleide Rodrigues Guimarães e Francilene Jane Rodrigues Pereira e Irmãos: Francildo Rodrigues Pereira, Francisco Rodrigues dos Santos Júnior e Francieudo Rodrigues Pereira, que cresceram na amizade e cooperação pelo bem familiar.

In memorian de meus Avós: paternos - Antônio Rodrigues Ferreira e Vitória Ferreira Rodrigues, e maternos - José Pereira Cordão e Raquel Francisca Pereira Cordão, pelo grande carinho e amor que sempre me transmitiram.

A meus Tios, Manoel Pereira Cordão, Joaquim Pereira Cordão, Antonio Pereira Cordão, Luís Rodrigues dos Santos (in memorian) e Luís da Verdura e Tias Josefa Pereira Araújo, Águida Neta dos Santos Cordão, Inaciolina Paulo Cordão, Isa Maura Cordão e Eni Ferreira Rodrigues, pelos ensinamentos.

A meus sobrinhos Jonathan, Tawan, Rian, João Paulo Rodrigues, Miguel, João Paulo Bento, Cleissom, Felipe, Manoel Carlos, Luís Eduardo e Jefferson e sobrinhas Arlety Raquelly, Thayanne, Tamires, Maria Eduarda, Vitória Raquel, Sabrina, Cristiane, Renata, Fabiana, Joana, Amanda, Larissa, Aparecida, Claudia, Eliane, Julia, Maria Luisa, Sofia, Jennifer, Bia, Karine, Giovanna, Maria Eduarda e Marília que tornaram nossos dias felizes.

Aos Primos Luís Rodrigues dos Santos Júnior; Sales, Neto, César, Maurício, Júnior e Adalberto de Tia Anita Rodrigues; Galberto, Gordo, Magela (in memorian) e Nego de Tio Manoel Rodrigues dos Santos (in memorian); Antônios (in memorian) dos Tios José Rodrigues dos Santos (in memorian) e Francisca Rodrigues (in memorian); Antônios dos Tios Severino Rodrigues dos Santos e Maria Rodrigues Justino (in memorian); José Rodrigues do Tio João Rodrigues dos Santos (in memorian); Geraldo e Renato de Tia Terezinha Rodrigues (in memorian); Rômulo, Rêmulô e Rimerson de Tio Joaquim Pereira Cordão; Maécio dos Santos Cordão; Leóstenes, Washington, Whéllyson e Juan (in memorian) Pereira Araújo de Tia Josefa Pereira Araújo (Netinha); Maurício e Mailson de Tio Antonio Pereira Cordão e Primas Serizeuda, Serineide (in memorian), Aurineide, Vitória e Ana Klébia de Tio Luís Rodrigues dos Santos (in memorian); Lúcia

(in memorian) e Damiana (Marluce) de Tia Anita Rodrigues; Gorete e “Caçula” de Tio Manoel Rodrigues dos Santos (in memorian); Aluska dos Santos Cordão; Monalisa e Maisa de Tio Antonio Pereira Cordão; Marinete, Francinete, Antonia, Nininha, Teca, madrinha Mozinete e Fátima de Tia Francisca Rodrigues (in memorian); Teresa, Vitória e Desterro de Tia Maria Rodrigues (in memorian); Socorro e Do Carmo (in memorian) de Tia Lalá Rodrigues (in memorian); Fátima e Rosana de Tia Terezinha Rodrigues (in memorian); Marluce e Anita de Tio Severino Rodrigues dos Santos; Maria e Vitória de Tia Ana Rodrigues; demais primos e primas, pouquíssimos tenho certeza, não citados.

A Dona Maria Barbosa dos Santos e a Seu João Paulo dos Santos, meus Sogros, e a todos os meus Cunhados (as) e Concunhados (as), pela confiança e amigável convívio ao longo desses anos.

A todos os parentes e familiares que acreditam no meu potencial e sempre me incentivaram nesta caminhada.

Aos amigos e àquelas pessoas que, direta ou indiretamente, me incentivaram e acreditaram no meu potencial, meu muito obrigado e um grande abraço.

Aos Colegas de trabalho Paulo de Tarso Firmino, Geraldo Santos, Gleibson Dionízio Cardoso, Isaiás Alves, Dalfran Vale e José Carlos Aguiar, dentre vários outros.

Aos Funcionários da Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, D. Aparecida, Seu Gilson e Isaias e do Laboratório de Irrigação e Salinidade – LIS, José Maria e Doutor, todos da Universidade Federal da Paraíba – UFCG, pelo pronto atendimento às solicitações demandadas.

Aos meus Colegas de Curso, Whéllyson Pereira Araújo, Érica Samara Araújo Barbosa de Almeida, Francisco Pereira Cordão Sobrinho, Francisco Alexandria Júnior, Alberto Callado, Wilson, Carlos Pedro, Luciano Sabóia, Arsênio, Marcos, Janivan, Sebastião e Geovani, pela cooperação nos estudos.

A TODOS VOCÊS, MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS.

“Estou sempre alegre. Essa é a melhor maneira de resolver os problemas da vida.”

Charles Chaplin

e

“Decidi não esperar as oportunidades e, sim, buscá-las. Decidi ver cada dia como uma nova oportunidade de ser feliz.”

Walt Disney,

OUTRORA DISSERAM O QUE PENSO HOJE.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
2. OBJETIVOS.....	22
2.1. Objetivo Geral.....	22
2.2. Objetivos Específicos.....	22
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	23
3.1. Importância do gergelim.....	23
3.2. Necessidades hídricas das culturas.....	25
3.2.1. Evapotranspiração de referência (ET_0).....	26
3.2.2. Evapotranspiração da cultura (ET_c).....	27
3.2.3. Coeficientes de cultivo (K_c).....	29
3.3. Regiões áridas e semiáridas e o suprimento hídrico às culturas.....	30
3.4. Necessidades hídricas do gergelim.....	31
3.5. Análise de crescimento.....	34
3.6. Eficiência hídrica.....	35
3.6.1. Eficiência de uso de água (EUA).....	35
3.6.2. Fator de resposta ao estresse hídrico (K_y).....	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1. Condução geral da área experimental.....	37
4.1.1. Local.....	37
4.1.2. Solo e água.....	38
4.1.3. Delineamento experimental.....	39
4.1.4. Plantio.....	39
4.2. Determinação da evapotranspiração de referência (ET_0) pelo método de Penman-Monteith.....	42
4.3. Determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) pelo método do balanço hídrico no solo.....	44
4.4. Estimativas do coeficiente de cultivo (K_c).....	51
4.5. Análise de crescimento.....	51
4.6. Componentes da produção.....	54
4.7. Eficiência hídrica.....	55
4.8. Análises estatísticas.....	56

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.1. Evapotranspiração de referência (ET_0) calculadas pelo método de Penman-Monteith.....	58
5.2. Evapotranspiração da cultura (ET_c) do gergelim determinada pelo balanço hídrico no solo.....	58
5.3. Estimativas do coeficiente de cultivo (K_c) do gergelim.....	60
5.4. Análise de crescimento não destrutiva do gergelim nas lâminas de irrigação aplicadas.....	62
5.5. Componentes da produção do gergelim nas lâminas de irrigação aplicadas.....	71
5.6. Eficiência hídrica do gergelim nas lâminas de irrigação aplicadas.....	75
6. CONCLUSÕES.....	77
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
8. ANEXOS.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Altura da planta (cm)
a	Parâmetro dos modelos de regressão não lineares utilizados (adimensional)
α	Parâmetro da curva de retenção de água no solo (adimensional)
AC	Ascensão capilar de água (mm d^{-1})
A_f	Área foliar por planta (cm^2)
b	Parâmetro dos modelos de regressão não lineares utilizados (adimensional)
C	Comprimento longitudinal da folha (cm)
CA	Conteúdo de água (%)
CC	Capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
d	Dia (dia)
DAE	Dias após a emergência (dias)
DC	Diâmetro caulinar (mm)
DP	Drenagem profunda de água ou percolação (mm d^{-1})
Δ	Declividade da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
$\frac{\Delta H_t}{\Delta z}$	Gradiente de potencial total de água no solo (kPa)
ΔH_t	Varição do potencial total de água de L - z a L + z (m) do solo no tempo (kPa)
Δh	Varição do armazenamento de água no perfil do solo (mm d^{-1})
Δp	Varição do conteúdo de água da planta (mm d^{-1})
Δz	Varição da profundidade entre L- z e L + z (m)
ΔZ	Varição da profundidade entre 0 e L (m)
e_a	Pressão atual média diária de vapor (kPa)
e_s	Pressão média diária de saturação de vapor (kPa)
Es	Escoamento superficial de água (mm d^{-1})
Ess	Escoamento subsuperficial de água (mm d^{-1})
ETc	Evapotranspiração da cultura (mm d^{-1})
ETm	Lâmina máxima de irrigação aplicada (mm)
$\frac{ET_c}{ET_m}$	Lâmina de irrigação relativa (adimensional)
$1 - \frac{ET_c}{ET_m}$	Decréscimo relativo na lâmina de irrigação (adimensional)
ET ₀	Evapotranspiração de referência (mm d^{-1})

EUA	Eficiência de uso de água (kg m^{-3})
F	Frequência ou turno de irrigação (Dias)
Fv	Fluxos descendentes (DP) ou ascendentes (AC) de água (mm d^{-1})
G	Fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
h	Horas (horas)
$H_{(L-z)ti}$	Potencial total de água no solo na profundidade L - z (m) no tempo inicial (kPa)
$H_{(L-z)tf}$	Potencial total de água no solo na profundidade L - z (m) no tempo final (kPa)
$H_{(L+z)ti}$	Potencial total de água no solo na profundidade L + z (m) no tempo inicial (kPa)
$H_{(L+z)tf}$	Potencial total de água no solo na profundidade L + z (m) no tempo final (kPa)
I	Irrigação (mm d^{-1})
IAF	Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
Im	Índice hídrico (adimensional)
Ins	Insolação (horas)
Kc	Coefficiente de cultivo (adimensional)
Kcb	Coefficiente de cultivo basal (adimensional)
Ke	coeficiente da evaporação da água no solo (adimensional)
Kpan	Coefficiente de cultivo por evaporação do tanque classe A (adimensional)
Ky	Fator de resposta ao estresse hídrico (adimensional)
$\bar{K}(\theta)$	Condutividade capilar (mm d^{-1})
K_0	Condutividade hidráulica (mm d^{-1})
L	Profundidade efetiva do sistema radicular (m)
LL	Lâmina líquida ou volume de reposição de água (mm)
M	Parâmetro da curva de retenção de água no solo (adimensional)
N	Parâmetro da curva de retenção de água no solo (adimensional)
NC	Número de cápsulas ou frutos por planta
O	Teor de óleo (%)
p	Fração de depleção de água no solo (adimensional)
P	Precipitação pluvial (mm d^{-1})
PMP	Ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
Press	Pressão atmosférica (hPa)
Ra	Rendimento atual (kg ha^{-1})
Rm	Rendimento máximo (kg ha^{-1})
$\frac{R_a}{R_m}$	Rendimento relativo (adimensional)

$1 - \frac{R_a}{R_m}$	Decréscimo no rendimento relativo (adimensional)
Rn	Saldo de radiação (MJ m ⁻² d ⁻¹)
S	Área foliar por folha (cm ²)
$\left(\overline{\sum_L^0 \theta_{ti}}\right)$	Média do conteúdo volumétrico de água (m ³ m ⁻³) medidos de 0 a L (m) no tempo inicial
$\left(\overline{\sum_L^0 \theta_{tf}}\right)$	Média do conteúdo volumétrico de água (m ³ m ⁻³) medidos de 0 a L (m) no tempo final
t	Tempo (Dias)
T	Temperatura média diária do ar (°C)
TCAA	Taxa de crescimento absoluto da altura (cm d ⁻¹)
TCADC	Taxa de crescimento absoluto do diâmetro caulinar (cm d ⁻¹)
TCAAF	Taxa de crescimento absoluto da área foliar (cm ² d ⁻¹)
TCRA	Taxa de crescimento relativo da altura (cm cm ⁻¹ d ⁻¹)
TCRDC	Taxa de crescimento relativo do diâmetro caulinar (cm cm ⁻¹ d ⁻¹)
TCRAF	Taxa de crescimento relativo da área foliar (cm ² cm ⁻² d ⁻¹)
Tf	Tempo final (Dias)
Ti	Tempo inicial (Dias)
T_máx	Temperatura máxima mensal do ar (°C)
T_méd	Temperatura média mensal do ar (°C)
T_mín	Temperatura mínima mensal do ar (°C)
Θ	Conteúdo volumétrico de água (m ³ m ⁻³)
θc	Conteúdo crítico de água no solo para a cultura (m ³ m ⁻³)
Θr	Conteúdo de água residual (m ³ m ⁻³)
Θs	Conteúdo de água de saturação (m ³ m ⁻³)
θ _{(L-z)ti}	Conteúdo volumétrico de água (m ³ m ⁻³) em L - z (m) no tempo inicial
θ _{(L+z)ti}	Conteúdo volumétrico de água (m ³ m ⁻³) em L + z (m) no tempo inicial
θ _{(L-z)tf}	Conteúdo volumétrico de água (m ³ m ⁻³) em L - z (m) no tempo final
θ _{(L+z)tf}	Conteúdo volumétrico de água (m ³ m ⁻³) em L + z (m) no tempo final
θz	Conteúdo de água na profundidade z (m) do solo (m ³ m ⁻³)
U ₂	Velocidade média diária do vento (m s ⁻¹)
UR	Umidade relativa do ar (%)
x	Dias após a emergência das plantas (Dias)
x ₀	Parâmetro dos modelos de regressão não lineares utilizados (adimensional)

z	Múltiplo da profundidade efetiva das raízes (m)
Y_j	Variável sendo analisada para cada tratamento “j” de irrigação
Y_a	Rendimento atual (kg ha^{-1})
Y_m	Rendimento máximo (kg ha^{-1})
$\frac{Y_a}{Y_m}$	Rendimento relativo (adimensional)
$1 - \frac{Y_a}{Y_m}$	Decréscimo no rendimento relativo (adimensional)
γ	Coefficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Ψ_m	Potencial matricial (kPa)

LISTA DE FIGURAS

Figura 01.	Elementos do balanço hídrico no solo.....	28
Figura 02.	Variação dos valores de coeficientes de cultivo (K_c) em função das variações nas características da cultura, ao longo do ciclo.....	30
Figura 03.	Imagem de satélite da localização da área experimental (retângulo com bordas amarelas). Barbalha, CE, 2012.....	37
Figura 04.	Layout da área experimental e do sistema de irrigação. Barbalha, CE, 2012.....	40
Figura 05.	Detalhamento da parcela experimental visto por entre as duas linhas laterais de aspersores. Barbalha, CE, 2012.....	40
Figura 06.	Adubação de fundação e marcação das linhas de plantio (0,70 m entre fileiras de gergelim). Barbalha, CE, 2012.....	41
Figura 07.	Detalhes do A) caule, folhas, cápsulas, B) planta seca e sementes do gergelim BRS 196 CNPA G4. Barbalha, CE, 2012.....	41
Figura 08.	Curvas de retenção do conteúdo de água do solo da área experimental nas profundidades de 0-30 e 30-60 cm do perfil do solo. Barbalha, CE, 2012.....	46
Figura 09.	Datalogger, haste graduada com sensores e introdução da sonda no tubo de acesso para leitura do conteúdo de água no solo a diferentes profundidades. Barbalha, CE, 2012.....	47
Figura 10.	Equação de calibração da sonda Diviner 2000®.....	47
Figura 11.	Perfil do conteúdo de água no solo para duas medições no tempo. Barbalha, CE, 2012.....	50
Figura 12.	Variação da evapotranspiração de referência (ET_0) e da cultura (ET_c) do gergelim e do coeficiente de cultivo (K_c), ao longo do ciclo. Barbalha, CE, 2012.....	61
Figura 13.	Curvas e equações ajustadas do crescimento em altura (A) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	63
Figura 14.	Curvas e equações ajustadas da taxa de crescimento relativo da altura (TCRA) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	64

Figura 15.	Curvas e equações ajustadas do crescimento em diâmetro caulinar (DC) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	66
Figura 16.	Curvas e equações ajustadas da taxa de crescimento absoluto do diâmetro caulinar (TCADC) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	67
Figura 17.	Curvas e equações ajustadas da taxa de crescimento relativo do diâmetro caulinar (TCRDC) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	67
Figura 18.	Curvas e equações ajustadas do crescimento em área foliar (A_f) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	69
Figura 19.	Curvas e equações ajustadas do índice de área foliar (IAF) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	69
Figura 20.	Rendimento de sementes do gergelim em função das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	72
Figura 21.	Teor de óleo das sementes do gergelim em função das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	74
Figura 22.	Eficiência de uso da água do gergelim em função das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	75
Figura 23.	Fator de resposta ao estresse hídrico (K_y) durante o ciclo do gergelim em função das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	76
Figura 24.	Variação do conteúdo de água nas profundidades do solo de 10, 20, 30 e 40 cm em cada lâmina de irrigação aplicada durante o período de avaliação do balanço de água no solo (I = Irrigação; θ z cm = Conteúdo de água na profundidade “z” do solo; θ_c = Conteúdo crítico de água no solo para a cultura do gergelim; CC = Capacidade de campo; PMP = Ponto de murcha permanente). Barbalha, CE, 2012.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 01.	Valores médios da pressão atmosférica (Press), temperatura média (T_méd), temperatura máxima (T_máx), temperatura mínima (T_mín), precipitação (P), umidade relativa do ar (UR) e insolação total (Ins) nos meses do estudo. Barbalha, CE, 2012.....	37
Tabela 02.	Características químicas do solo (camada 0-20 cm) da área experimental. Barbalha, CE, 2012.....	38
Tabela 03.	Caracterização textural e física do solo da área experimental experimental nas profundidades de 0-30 e 30-60 cm do perfil do solo. Barbalha, CE, 2012.....	38
Tabela 04.	Análise química da água utilizada na irrigação da área experimental. Barbalha, CE, 2012.....	39
Tabela 05.	Valores dos parâmetros de ajuste das curvas de retenção do conteúdo de água no solo e da condutividade hidráulica, determinados nas profundidades de 0-30 e 30-60 cm do perfil do solo da área experimental. Barbalha, CE, 2012.....	46
Tabela 06.	Evapotranspiração de referência (ET ₀) calculadas pelo método de Penman-Monteith, durante o período experimental. Barbalha, CE, 2012.....	58
Tabela 07.	Balanço hídrico no solo cultivado com gergelim, durante o período de estudo. Barbalha, CE, 2012.....	59
Tabela 08.	Valores médios do coeficiente de cultivo (Kc) por fase fenológica do ciclo do gergelim. Barbalha, CE, 2012.....	60
Tabela 09.	Resumo da análise de variância do número de cápsulas (NC), rendimento (R), teor de óleo (O) e eficiência de uso de água (EUA) do gergelim em função das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012.....	71

Pereira, José Rodrigues. *Comportamento e necessidades hídricas do gergelim sob diferentes regimes de irrigação*. Universidade Federal de Campina Grande, PB. (Tese de Doutorado em Irrigação e Drenagem).

RESUMO

Objetivando determinar o comportamento do crescimento e da produção e as necessidades hídricas do gergelim BRS 196 CNPA G4 em diferentes regimes de irrigação, foi instalado, na Embrapa Algodão, Barbalha, CE, em 2012, um experimento em blocos casualizados com quatro tratamentos de irrigação (lâminas de 305, 436, 567 e 698 mm, correspondendo a lâmina de 567 mm a 100% da ETc) distribuídos em parcelas, com três repetições. A evapotranspiração da cultura (ETc) utilizada para calcular as lâminas de água de irrigação foi calculada multiplicando a evapotranspiração de referência (ETo), determinada pelo Método de Penman-Monteith com dados climatológicos obtidos na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, Barbalha, CE, pelos coeficientes de cultura (Kc) recomendados pela FAO. A ETc do gergelim foi obtida no campo pelo método do balanço hídrico do solo. As variáveis analisadas foram a altura da planta, o diâmetro do caule, a área foliar, o índice de área foliar e as taxas de crescimento absoluto e relativo da altura, do diâmetro caulinar e da área foliar. Na colheita foi contado o número de cápsulas ou de frutos por planta e determinados o rendimento e o teor de óleo das sementes, o fator de resposta ao estresse hídrico (Ky) e a eficiência de uso de água (EUA). A altura, o diâmetro caulinar, a área foliar e o índice de área foliar do gergelim aumentaram com a irrigação. O maior crescimento aconteceu até os 70 ou 75 dias após a emergência (DAE). O maior crescimento foi obtido, em geral, no tratamento de irrigação de 698 mm. A lâmina de irrigação de 698 mm foi a que promoveu o maior rendimento e teor de óleo das sementes do gergelim e a de 305 mm foi a que possibilitou a melhor EUA de irrigação. O Kc médio do gergelim foi de 0,45 para a fase de Estabelecimento, 0,62 para a de Crescimento, 0,97 para a de Floração e 0,57 para a de Maturação. O gergelim se mostrou tolerante à falta de água no solo, com Ky igual a 0,77.

Palavras-chave: *Sesamum indicum* L., fluxos de água, consumo de água, taxas de crescimento, rendimento.

Pereira, José Rodrigues. *Behavior and water consumption of sesame on different irrigation depths*. Federal University of Campina Grande, Paraíba State, Brazil. (Doctoral Thesis in Irrigation and Drainage).

ABSTRACT

In order to determine the growth and production behavior and the water consumption of the sesame BRS 196 CNPA G4 crop on different irrigation regimes, it was carried out, at Embrapa Cotton, Barbalha County, Ceará State, Brazil, in 2012, an study outlined in randomized blocks with four irrigation treatments (irrigation depths of 305, 436, 567 and 698 mm on the cycle, being the 567 mm irrigation depth equal to 100% of the ETc), distributed in plots with three replications. The crop evapotranspiration (ETc), used to calculate the irrigation depths, was calculated multiplying the reference evapotranspiration (ETo) calculated by the Penmann Monteith method with climatological data obtained from an Station located in the National Meteorological Institute, Barbalha County, CE State, by the crop coefficients (Kc) recommended by FAO. The *in situ* sesame crop evapotranspiration (ETc) was obtained by the soil water balance. The plant variables analyzed were plant height, stem diameter, leaf area, leaf area index and the absolute and relative growth rates of plant height, stem diameter and leaf area. At harvest it was measured capsules/fruits number and determined the yield, the oil content of the seeds, the water stress response factor (Ky) and the water use efficiency (WUE). Sesame plant height, stem diameter, leaf area and leaf area index increased with irrigation being obtained the greatest values until 70 or 75 days after emergence (DAE) in general on the 698 mm irrigation depth. The highest yield and oil content of the seeds was obtained with the irrigation depth of 698 mm and the 305 mm proportionated the best WUE. The medium sesame Kc was 0.45 for the establishment phase, 0.62 for the growth, 0.97 for the floration and 0.57 for the maturation phase. The Ky (0.77) indicated that sesame plants are tolerant to lack of soil water.

Keywords: *Sesamum indicum* L., water flows, water balance, growth rates, yield.

1. INTRODUÇÃO

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) tem alcançado importância econômica no Brasil e no Mundo devido ao alto valor proteico e terapêutico de suas sementes e coprodutos e às propriedades intrínsecas e alto valor de mercado de seu óleo, componentes desejáveis nos segmentos fitoterápico, fitocosmético, nutracêutico e farmacêutico da indústria nacional e internacional.

O Brasil é um pequeno produtor de gergelim (BELTRÃO et al., 2008). No Nordeste brasileiro é uma das culturas substitutas ao algodão (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* H.) e no Sudeste e Centro-Oeste, opção para diversificação agrícola (ARRIEL et al., 2007).

A região semiárida se caracteriza pela precipitação baixa e irregular e alta evaporação (LIMA, 2011). A baixa produtividade do gergelim em regiões semiáridas advém do baixo uso de insumos (fertilização, irrigação, controle de pragas etc.) e da ocorrência de estresses abióticos (PHAM et al., 2010).

Na porção setentrional da região semiárida brasileira o regime de chuvas, irregular e escasso, é marcado pela concentração das precipitações em uma única estação de apenas três meses (fevereiro a maio) ao ano, quando em anos de precipitação normal (MONTEIRO, 2007; LIMA, 2011).

Nas regiões semiáridas a disponibilidade irregular de água no solo afeta significativamente a produção agrícola e a utilização da irrigação é que tem assegurado o crescimento e o desenvolvimento das culturas melhorando substancialmente a produtividade (AMORIM NETO et al., 2001).

A cultura do gergelim apresenta boa produtividade (800 a 1500 kg ha⁻¹) quando comparada a outras culturas alimentares nas condições adversas do Nordeste brasileiro. Contudo, acredita-se que seja possível obter um expressivo aumento de produtividade com o uso da irrigação conforme referido por Weiss (2000), Arriel et al. (2007), Uçan et al. (2007), Beltrão et al. (2008), Terefe et al. (2012), dentre outros.

A adição de tecnologias para aumento da produtividade do gergelim tais como o uso da técnica de irrigação, faz-se necessária, visto sua importância socioeconômica, especialmente em regiões agrícolas áridas e semiáridas, onde é usada para suplementar a precipitação natural nas necessidades de água das culturas (FARIAS et al., 2000).

Compreender não apenas a relação entre a planta e o consumo de água mas também o desenvolvimento de diferentes sistemas de manejo baseado neste conhecimento, pode ajudar a maximizar o rendimento das culturas (UÇAN et al., 2007).

Além do conhecimento da quantidade de água requerida pelas culturas, ainda é necessário verificar o comportamento da cultura em diferentes volumes de água e identificar os estágios de crescimento e desenvolvimento de maior consumo, tal como dos períodos críticos em que a falta ou o excesso causa decréscimos de crescimento e de produção (BERNARDO et al., 2009).

Para a adoção de um sistema de cultivo irrigado do gergelim que seja rentável tanto do ponto de vista econômico como ambiental, há a premência de se realizar pesquisas sobre o seu consumo hídrico determinando-se, *in situ*, a evapotranspiração da cultura (ETc) em cada fase fenológica e que o resultado gerado promova o crescimento e o desenvolvimento pleno da cultura e melhor eficiência de uso de água (EUA).

Informações referentes à evapotranspiração da cultura do gergelim (ETc) e aos valores de coeficientes de cultivo (Kc) que possam subsidiar seu manejo da irrigação, na região semiárida, são escassas.

Os valores de coeficientes de cultivo (Kc) tabelado (Kc-médio e Kc-final), encontrados no Boletim 56 da Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (ALLEN et al., 2006) foram obtidos para uma condição de clima subúmido e em culturas não estressadas, alcançando máxima produção. Sabe-se, contudo, que em condições de campo estes valores variam em função das condições locais e conforme a época de cultivo.

Para condições mais áridas, como as do semiárido nordestino e com maiores demandas evapotranspirométricas, o uso daqueles coeficientes necessitará de correções para que possa representar efetivamente a situação do consumo hídrico da cultura, razão pela qual o coeficiente de cultivo (Kc) deverá ser determinado nas condições locais.

O método de Penman-Monteith é o recomendado pela FAO (ALLEN et al., 2006) por prover resultados relativamente precisos e consistentes de ET_0 em qualquer âmbito geográfico e climático e por considerar parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos na equação.

Por sua vez, o método do balanço hídrico no solo tem, como característica, requerer poucos parâmetros para sua determinação além de fornecer valores confiáveis (FERNANDES et al., 1999).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral:

- Determinar o comportamento do crescimento e da produção e as necessidades hídricas da cultura do gergelim BRS 196 CNPA G4 em diferentes regimes de irrigação.

2.2. Objetivos Específicos:

- Avaliar a performance do crescimento do gergelim nas diferentes lâminas de irrigação, aplicadas com base na evapotranspiração da cultura (ETc);

- Identificar a(s) lâmina(s) de irrigação aplicada(s) que potencialize(m) o desempenho dos componentes da produção e da eficiência de uso da água (EUA) de irrigação do gergelim;

- Determinar a evapotranspiração da cultura (ETc), pelo método do balanço hídrico no solo, e o coeficiente de cultivo (Kc) em cada fase fenológica do ciclo do gergelim; e,

- Determinar a tolerância ao estresse hídrico (Ky) do gergelim.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Importância do gergelim

O gergelim, também conhecido como “ajonjoli”, “gingerly”, “sesame”, “sésamo” e “till”, é uma oleaginosa herbácea da família Pedaliaceae, classe Magnoliopsida, ordem Lamiales, subordem Asteranae. É constituída por 13 gêneros e 75 espécies encontradas em áreas tropicais e subtropicais (BELTRÃO et al., 2001; BOYDAK et al., 2007; ELLEUCH et al., 2007; KOCA et al., 2007; UZUN et al., 2007; WU, 2007)

É reconhecido como uma das mais antigas culturas do mundo (WEISS, 2000; BEDIGIAN, 2004). Registros arqueológicos indicam que tem sido usado na Índia há mais de 5000 anos (BELTRÃO et al., 2001; BEDIGIAN, 2004).

Teve origem no leste da África e na Índia (BEDIGIAN, 2003), sendo a Turquia conhecida como o segundo centro de origem genética (KOCA et al., 2007; UZUN et al., 2007). Desde então, espalhou-se para muitas partes do mundo incluindo a região do Leste Africano (WERE et al., 2006).

É uma importante oleaginosa cultivada em muitas partes do mundo em áreas tropicais e subtropicais, incluindo Índia, China, Sudão, Tunísia, Egito, Tailândia, México, Guatemala, El Salvador, Afeganistão, Paquistão, Bangladesh, Indonésia, Sri Lanka, Arábia Saudita e Turquia (ELLEUCH et al., 2007; KOCA et al., 2007; UZUN et al., 2007; WU, 2007).

Atualmente, a Índia e a China são os maiores produtores mundiais de gergelim seguidas por Myanmar, Sudão, Uganda, Nigéria, Paquistão, Tanzânia, Etiópia, Guatemala e Turquia. A produção mundial flutua com a economia local, com as variações da produção agrícola e com as condições climáticas (CAGRAN, 2006).

Cerca de 3,3 milhões de toneladas de gergelim são produzidos em 7,5 milhões de hectares (440 kg ha⁻¹) em todo o mundo (KOCA et al., 2007; UZUN et al., 2007). A baixa produtividade do gergelim advém do baixo uso de insumos (fertilização, irrigação, controle de pragas etc.) e da ocorrência de estresses abióticos (PHAM et al., 2010).

O gergelim foi considerado, pelo Instituto Internacional de Recursos Genéticos de Plantas (IPGRI), como uma das espécies mais negligenciadas e subutilizadas, embora tenha grande potencial econômico de cultivo (WERE et al., 2006) em virtude de ser fonte alternativa de renda e proteína para consumo e enriquecimento de outros produtos, combinado aos segmentos fitoterápico e fitocosmético (CHAKRABORTHY et al., 2008; LIMA, 2011) bem como na nutracêutica, farmacêutica e na indústria, por seu alto teor de

óleo, de proteínas e de antioxidantes nas sementes (KOCA et al., 2007) além das formas diversificadas de exploração, tanto no mercado nacional como no internacional (LIMA, 2011).

A cultura do gergelim, ainda pouco conhecida no Brasil, pode tornar-se uma alternativa para a produção de grãos por produtores do Nordeste e dos Cerrados brasileiros, uma vez que é visto como alimento funcional e ter boas perspectivas de mercado, especialmente de seu óleo (GRILO JUNIOR e AZEVEDO, 2013). No Nordeste brasileiro, a exploração do gergelim se mantém em níveis de subsistência, com pouco excedentes comercializáveis, apesar da boa adaptabilidade da cultura (ANDRADE, 2009).

Internamente, o gergelim é cultivado sobretudo no Nordeste do país – Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Bahia – e no Centro-Sul; no estado de São Paulo o gergelim é plantado há mais de 40 anos visando à produção de óleo e ao uso em indústrias (doce), em restaurantes e em casas de comida natural (CARVALHO et al., 2001).

A composição química do gergelim mostra que a semente é uma fonte significativa de óleo (44-58%), de proteínas (18-25%), de carboidratos (13,5%) e de cinzas (5%) (ELLEUCH et al., 2007). Dependendo da variedade, a semente integral do gergelim pode conter em torno de 54% de óleo e 22% de proteínas, além de ser considerada rica em aminoácidos sulfurados, característica rara entre as proteínas de origem vegetal (QUEIROGA e SILVA, 2008).

A semente de gergelim é uma fonte rica de óleo comestível, em geral com teor variando de 37 a 63%, dependendo das cultivares e das condições ambientais (GRICHAR et al., 2001; CHUNG et al., 2004; SUJA et al., 2004; BOYDAK et al., 2007; KARAASLAN et al., 2007; WU, 2007; CORSO, 2008; TEREFE et al., 2012). Suas sementes são utilizadas como alimento nutritivo e em confeitaria (GRICHAR et al., 2001).

Seu óleo é um produto estável em virtude dos antioxidantes naturais sesamol e sesamolina reduzirem a taxa de oxidação (CHUNG et al., 2004; SUJA et al., 2004; WU, 2007; TEREFE et al., 2012) tendo, portanto, vida longa de prateleira podendo ser misturado com óleos vegetais menos estáveis para melhoria da sua longevidade (CHUNG et al., 2004; SUJA et al., 2004). Também pode ser usado para a produção de óleos perfumados, manufaturados ou industrializados e para fins medicinais (BOYDAK et al., 2007).

A principal demanda de gergelim provém da indústria alimentícia, sendo que 70% da produção de grãos são na maioria dos países importadores, utilizados para a elaboração de óleo e produtos alimentícios (QUEIROGA e SILVA, 2008; ARRIEL et al., 2009). Na

região do Leste Africano é cultivado sobremaneira para a produção de grãos e extração de óleo (WERE et al., 2006). O uso de suas sementes tem crescido em torno de 15% ao ano, graças ao aumento da quantidade de produtos industrializáveis para o consumo (ARRIEL et al., 2009).

A cultivar BRS 196 CNPA G4, resistente à mancha angular e à murcha de *macrophomina*, é adaptada às condições de cultivo da região Nordeste e dos Cerrados do Brasil; suas plantas apresentam haste de cor verde, ausência de pelos, porte mediano (155 cm), ciclo precoce de 90 dias, crescimento ramificado, sementes de coloração creme, um fruto por axila foliar e teor de óleo de 48 a 50% (BEZERRA et al., 2010).

3.2. Necessidades hídricas das culturas

As plantas cultivadas estão constantemente expostas a estresses abióticos ou bióticos, e suas interações, que causam modificações no crescimento, no metabolismo e no rendimento agrícola (PINTO, 2006).

A água, além de ser o componente majoritário da célula vegetal, é essencial ao crescimento e à manutenção da turgescência (PINTO, 2006). Também transporta nutrientes para dentro e para toda a planta; é usada no processo fotossintético para produzir energia, açúcares, óleos e proteínas e; é essencial, através da transpiração, para refrigerar a planta e evitar a dessecação (SESACO, 2012).

A água também é um dos fatores mais indispensáveis para a produção agrícola, devendo-se ter a máxima atenção para com seu uso, pois sua falta ou excesso afeta o crescimento e o rendimento das culturas (DOOREMBOS e KASSAM, 2000; OLIVEIRA et al., 2011; SILVA et al., 2011; SESACO, 2012), tornando-se necessário o seu manejo racional para maximizar a produção (ARAYA et al., 2011).

O aumento da produtividade depende da aplicação oportuna e adequada da irrigação (UÇAN e KILLI, 2010). Lâminas d'água em excesso podem provocar perdas de água e lixiviação de nutrientes, por meio da percolação abaixo da zona das raízes, e, em terrenos mal drenados podem provocar a saturação do solo. Por outro lado, quantidade insuficiente de água proporciona redução da reserva útil do solo prejudicando as plantas, acentuando os problemas relacionados com a salinização do solo (ALLEN et al., 2006).

Em deficiência hídrica a planta pode desencadear respostas que irão determinar sua sobrevivência e reprodução. Entre essas respostas se incluem os mecanismos de controle estomático e da maximização da absorção de água, por meio do crescimento de raízes e do

ajuste osmótico (BRITO e BELTRÃO, 2011). Portanto, é necessária a determinação correta do consumo de água pelas plantas (UÇAN e KILLI, 2010).

Além de conhecer a quantidade de água a ser aplicada às culturas, também é oportuno verificar o comportamento da cultura em função das diferentes quantidades de água e identificar as fases de maior consumo, quando a falta ou o excesso provocaria maiores quedas de produção (BERNARDO et al., 2009)

A determinação das necessidades hídricas das culturas em seus diferentes estádios de crescimento e de desenvolvimento é uma etapa importante para o manejo da irrigação (DOORENBOS e KASSAM, 2000).

Os sistemas agrícolas irrigados têm, como objetivo, prevenir o estresse hídrico das plantas por meio de aplicações de quantidades adequadas de água às culturas, assegurando boas produções tanto em quantidade como em qualidade, em que o sistema solo-água-planta-atmosfera deve ser considerado um sistema dinâmico, fisicamente integrado, cujos processos de transporte ocorrem interativamente (GOMIDE e ALBUQUERQUE, 2008).

Neste sistema os parâmetros climáticos de superfície determinam a força de demanda hídrica, atuando como "dreno", os de solo controlam a fonte de água e os ligados à planta exercem influência direta sobre a transmissão de água da fonte para o dreno (GOMIDE e ALBUQUERQUE, 2008).

Torna-se evidente que, para determinar a evapotranspiração nos sistemas agrícolas irrigados, há necessidade de instrumentos de monitoramento e registro para medições, em tempo real, de parâmetros ligados ao sistema solo-água-planta-atmosfera (GOMIDE e ALBUQUERQUE, 2008).

3.2.1. Evapotranspiração de referência (ET_0)

Doorenbos e Pruitt (1997), Albuquerque et al. (2002) e Allen et al. (2006) definem ET_0 como a taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa de gramíneas verdes de 8 a 15 cm de altura, uniforme, em crescimento ativo sombreando completamente o solo no qual não exista limitação de água. Os valores de ET_0 estimados em diferentes localidades e épocas são comparáveis quando se referem à evapotranspiração da mesma superfície de referência. Os únicos fatores que afetam a ET_0 são os parâmetros climáticos (ALBUQUERQUE et al., 2002; ALLEN et al., 2006).

Para determinar a ET_0 foram desenvolvidos diversos métodos (Makking, Blaney-Criddle, Penman, Hargreaves, Thornthwaite-Matter, Linacre, Penman-Monteith, dentre outros) (DOORENBOS e PRUITT, 1997; DOORENBOS e KASSAM, 2000; ALLEN et al., 2006), cuja precisão depende dos parâmetros meteorológicos utilizados.

O método de Penman-Monteith tem embasamento físico e incorpora explicitamente tanto os parâmetros fisiológicos quanto os aerodinâmicos (ALBUQUERQUE et al., 2002; ALLEN et al., 2006), deste modo, este método tem sido referido como aquele que produz resultados relativamente exatos e consistentes da ET_0 em âmbito geográfico e climático (tanto em climas áridos como em úmidos), além de contar com ferramentas para uso na situação da falta de dados (ALLEN et al., 2006).

A ET_0 obtida por este método é multiplicada pelo K_c para obter as necessidades de água da planta (Evapotranspiração da cultura - ET_c), ou seja, os quantitativos ou volumes de reposição de água (LL) via irrigação (DOOREMBOS e KASSAM, 2000; ALLEN et al., 2006; GOMIDE e ALBUQUERQUE, 2008).

3.2.2. Evapotranspiração da cultura (ET_c)

A estimativa do consumo de água pelas plantas é feita com base nas perdas de água do sistema solo-planta para a atmosfera através dos processos de evaporação e de transpiração (ALBUQUERQUE et al., 2002; ALLEN et al., 2006) e pode ser determinada com o uso de evaporímetros (tanque de evaporação, Piché etc.) ou diretamente por lisímetros e através do método do balanço hídrico do solo (FERNANDES et al., 1999; ALLEN et al., 2006; REICHARDT e TIM, 2012).

O método do balanço hídrico no solo, estimado com base no princípio da conservação das massas, pode ser representado pela soma algébrica de todas as entradas (através da chuva ou irrigação, escoamento superficial e subsuperficial e ascensão capilar - consideradas positivas) e saídas (representadas pela evapotranspiração, água da planta, escoamento superficial e subsuperficial e drenagem profunda - negativas) de água em determinado volume de solo, durante um período de tempo resultando, conforme descrito pela Equação [1], no armazenamento de água no solo (CINTRA et al., 2000).

$$(P + I) \pm F_v \pm E_s \pm E_{ss} \pm \Delta p - ET_c = \pm \Delta h \quad [1]$$

em que:

P - precipitação pluvial em Δt (mm d^{-1});

I - irrigação (mm d^{-1});

F_v - drenagem profunda (DP) ou ascensão capilar (AC) em Δt (mm d^{-1});

E_s - Escoamento superficial em Δt (mm d^{-1});

E_{ss} - Escoamento subsuperficial em Δt (valores normalmente mínimos, considerados em áreas com solo com alta declividade) (mm d^{-1});

Δp - variação do conteúdo de água da planta em Δt (mm d^{-1})

ET_c - evapotranspiração da cultura durante o período considerado (Δt) (mm d^{-1});

Δh - variação do armazenamento de água no perfil do solo em Δt na camada da profundidade efetiva das raízes (mm d^{-1}).

O volume do solo considerado tem, por base, a configuração do sistema radicular da cultura submetido às peculiaridades dos fenômenos meteorológicos, dos atributos do solo e das características genéticas da cultura (CINTRA et al., 2000; ALLEN et al., 2006; BRITO et al., 2009; REICHARDT e TIMM, 2012), como esquematizado na Figura 01.

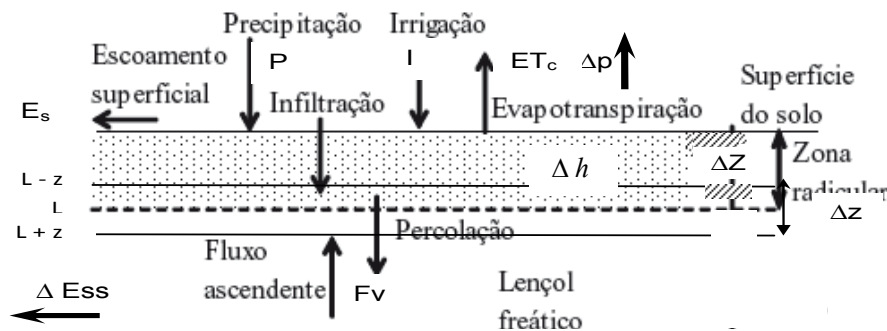


Figura 01. Elementos do balanço hídrico no solo

Fonte: Lima et al. (2010) modificado

Os fluxos de drenagem (F_v) (drenagem profunda – DP, valores negativos, ou ascensão capilar – AC, valores positivos) da água no solo são calculados pela equação de Darcy-Buckingham. A condutividade capilar, a variação do potencial total e do armazenamento da água do solo podem ser obtidos através de integrações numéricas utilizando-se o método gráfico trapezoidal (REICHARDT e TIMM, 2012).

O conteúdo de água do solo pode ser medido por diversos métodos, sendo o da reflectometria no domínio do tempo (TDR, Time-Domain Reflectometry, em inglês) e o da reflectometria no domínio da Frequência (FDR, Frequency Difrraction Relative, em inglês) os mais utilizados. O método da FDR consiste de um datalogger e de uma sonda acoplados, via cabo, a qual ao ser inserida em um tubo de acesso instalado no solo, provém automaticamente leituras do conteúdo da água do solo, a qualquer profundidade (ANDRADE JUNIOR et al., 2007; FRANCO, 2009; REICHARDT e TIMM, 2012).

O método do balanço hídrico no solo vem sendo bastante utilizado para se estimar a evapotranspiração da cultura (SOUZA et al., 2013) e a eficiência no uso de água (BRITO et al., 2009) de várias culturas por exigir poucos parâmetros e fornecer resultados com boa concordância de valores com os lisímetros (FERNANDES et al., 1999; REICHARDT e TIM, 2012).

3.2.3. Coeficientes de cultivo (Kc)

A relação entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) e a de referência (ET_0) pode ser integrada no coeficiente de cultivo (Kc) o qual procura ajustar as necessidades hídricas da cultura relacionando-a com a demanda hídrica que é influenciada pelo tipo de cultura, pela idade fenológica da mesma e pelas características climáticas do local (ALBUQUERQUE et al., 2002; ALLEN et al., 2006).

Os valores de Kc tabelado pela FAO (Kc-médio e Kc-final) representam a condição de clima subúmido com umidade relativa mínima média diária de 45% e velocidades médias de vento moderadas em torno de 2 m s^{-1} , culturas não estressadas, em excelentes condições agrônômicas e de manejo de água, alcançando máxima produção (condição padrão) (ALLEN et al., 2006).

Para condições mais úmidas ou áridas ou para maiores ou menores velocidades de vento e nos casos em que a densidade das plantas, a altura e a área foliar sejam menores que as obtidas na condição padrão, o valor do Kc-intermediário (fase de crescimento) e para a maioria dos cultivos o do Kc-final necessitará de correções adicionais (ALBUQUERQUE et al., 2002).

Para uma mesma cultura o valor de Kc não é constante pois muda com as condições climáticas (DOORENBOS e PRUITT, 1997; ALLEN et al., 2006) e, conforme visualizado na Figura 02, em função das variações nas características da cultura ao longo do ciclo da sementeira até a colheita (ALBUQUERQUE et al., 2002; ALLEN et al., 2006).

O Kc reflete a demanda hídrica local de determinada cultura e é influenciado por fatores ligados ao solo, à planta, à atmosfera e ao manejo cultural. Portanto, deve-se ter bastante cuidado ao se usar valores de Kc oriundos de outra região para não comprometer o manejo da irrigação (AGUIAR NETTO e BASTOS, 2013). Por isso são de extrema importância as pesquisas que contemplam a determinação de Kc regionais, visto que este índice representará, com maior confiabilidade, a demanda evapotranspirométrica local (BASTOS et al., 2013).

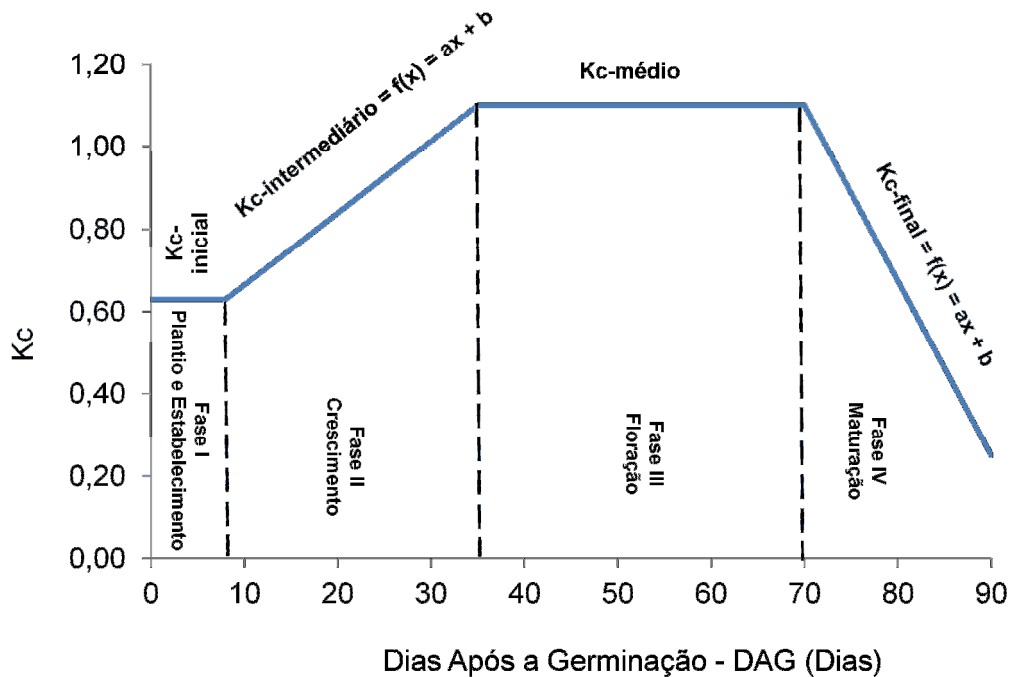


Figura 02. Variação dos valores de coeficientes de cultivo (K_c) em função das variações nas características da cultura, ao longo do ciclo

Fonte: Adaptado de Allen et al. (2006)

3.3. Regiões áridas e semiáridas e o suprimento hídrico às culturas

O clima semiárido é caracterizado por temperatura média anual variando de 23 a 27°C, precipitações médias anuais iguais ou inferiores a 800 mm por ano, alta insolação média anual (2800 horas por ano), evaporação maior que 2000 mm por ano e umidade relativa do ar média em torno de 50%. O balanço chuva *versus* evaporação é desfavorável em razão do volume de água evaporado ser cerca de três vezes o volume de água precipitado. Somente nos meses nos quais se concentram as chuvas é que este balanço é positivo e propicia condições para a prática da agricultura (MONTEIRO, 2007).

O regime de chuvas irregular e escasso é marcado pela concentração das precipitações em uma única estação, de apenas três meses ao ano, em anos de precipitação normal. O principal período da chuva da porção setentrional da região semiárida do Brasil se estende de fevereiro a maio (LIMA, 2011).

Suprir a evapotranspiração da cultura com a aplicação de água de irrigação, faz-se necessário sempre que a água proveniente da precipitação efetiva não for suficiente para atender à demanda hídrica das plantas e a disponibilidade de água do solo for esgotada em

níveis que provocarão redução significativa de produtividade (GOMIDE e ALBUQUERQUE, 2008).

Nas regiões áridas e semiáridas a disponibilidade irregular de água no solo afeta a produção agrícola enquanto a utilização da irrigação, geralmente praticada para suplementar a precipitação natural no atendimento das necessidades hídricas das culturas (FARIAS et al., 2000) tem assegurado o crescimento e o desenvolvimento das culturas melhorando substancialmente a produtividade (AMORIM NETO et al., 2001).

Os principais objetivos almeçados com o uso da técnica da irrigação nas quais englobam a maximização da produção, a racionalização do uso da mão-de-obra, energia, água e fertilizante e a aplicação correta da água, são indispensáveis para adotar o manejo correto dessa técnica (MIRANDA e PIRES, 2003) na região.

A quantidade de água a ser aplicada em cada irrigação e o momento de aplicação desta água, são parâmetros governados pelas condições climáticas locais, pelo tipo de cultura e seu estágio de crescimento e desenvolvimento, pela profundidade efetiva do sistema radicular e pela capacidade de armazenamento de água no solo (GOMIDE e ALBUQUERQUE, 2008).

Este manejo consiste, basicamente, na quantificação do volume de água a ser fornecido para as culturas que pode ser estimada através da evapotranspiração (BERNARDO et al., 2009).

3.4. Necessidades hídricas do gergelim

O gergelim, originário da África Tropical, normalmente é cultivado em condições de sequeiro, em regiões áridas e semiáridas, sob precipitações que variam de 300-600 mm (AHMED e MAHMOUD, 2010) e de 625-1100 mm anuais (TEREFE et al., 2012). Para diversos autores (GRICHAR et al., 2001; PASCHOLATI e WULFF, 2005; CAGRGAN, 2006; KIM et al., 2007; BEZERRA et al., 2010), esta cultura é regularmente submetida a um leve até severo déficit hídrico.

O gergelim requer, no mínimo, 300 mm bem distribuídos durante o ciclo mas a faixa ótima de precipitação é de 300 a 800 mm por ciclo para obtenção de excelentes produtividades (acima de 3000 kg ha⁻¹). Contudo, produtividades ótimas (1500 a 3000 kg ha⁻¹) são obtidas em áreas com 500 a 650 mm de precipitação anual, bem distribuídos nos 3 a 4 meses do seu ciclo (KIM et al., 2007; ARRIEL et al., 2009; SESACO, 2012; TEREFE et al., 2012).

A planta de gergelim é bastante sensível às condições ambientais e a fatores abióticos de déficit que, em geral favorecem o declínio quantitativo e/ou qualitativo na produtividade (UÇAN et al., 2007). Embora com boa tolerância à seca quando comparada a muitas outras culturas, é particularmente susceptível a danos ocasionados pela seca durante os estágios de germinação e de floração (KIM et al., 2007; UÇAN et al., 2007; TEREFE et al., 2012).

O gergelim é tolerante a seca mas não ao encharcamento e ao excesso de chuvas (WEISS, 2000; TEREFE et al., 2012). No entanto, isto não significa que crescimento e produtividade ótimos possam ser obtidos em baixíssima taxa de precipitação. Isto indica apenas que, uma vez estabelecido, o gergelim é capaz de suportar maior tensão de água no solo do que quaisquer outras plantas cultivadas (TEREFE et al., 2012). É sensível ao excesso de irrigação mas seu decréscimo reduz a produtividade (SAEIDI et al., 2012).

A exigência hídrica do gergelim está mais relacionada diretamente à distribuição da chuva do que mesmo à quantidade total durante o período vegetativo da planta. A máxima absorção de água ocorre no florescimento e após este período decresce gradualmente (WEISS, 2000; SESACO, 2012).

Embora comumente cultivado em terras áridas, responde de forma significativa à irrigação (UÇAN e KILLI, 2010), demonstrando todo o seu potencial produtivo (ALBUQUERQUE et al., 2011). Assim o gergelim, quando irrigado, frequentemente cresce mais e produz melhor do que no cultivo de sequeiro (TEREFE et al., 2012). Se a água está disponível em todo o ciclo de produção em geral o gergelim produzirá de 0,14 a 0,22 kg de sementes por m³ de água disponível (SESACO, 2012).

Allen et al. (2006), FAO-56, compilaram estimativas de Kc-médio e Kc-final para o gergelim de 1,10 e 0,25 respectivamente porém advindos de resultados de pesquisa de regiões fora do Brasil.

No município de Barbalha, CE, Amaral e Silva (2008) trabalhando com o gergelim BRS 196 CNPA G4 irrigado por aspersão utilizando o método do balanço hídrico do solo para determinação da ETc e de Penman-Monteith, da ET₀, ressaltam que a ETc do gergelim variou de um valor mínimo de 2,5 mm d⁻¹, aos 5 dias após o plantio (DAP), até o valor máximo de 11,6 mm d⁻¹, aos 30 DAP, obtendo Kc-intermediário e Kc-médio iguais a 0,6 e a 0,8, respectivamente.

Ahmed e Mahmoud (2010) concluíram, cultivando gergelim das cultivares Khidir e Promo, por duas safras sucessivas (2001/02 - 2002/03) em Shambat, Sudão, objetivando investigar lâminas de irrigação (750, 650, 550, 450 e 350 mm) com base na

evapotranspiração real da cultura (E_{Tr}) comparada com a ET_0 estimada por Penman-Monteith, Penman modificado e evaporação do tanque Classe A, que os coeficientes de cultivo calculados pelo método da evaporação do tanque Classe A foram, em todas as circunstâncias, menores que aqueles obtidos pelos métodos de Penman-Monteith e Penman modificado sendo a melhor eficiência de uso de água ($0,5 \text{ kg m}^{-3}$ em 2001/02 e $0,6 \text{ kg m}^{-3}$ em 2002/03), obtida na lâmina de água de irrigação de 650 mm.

Uçan et al. (2007) afirmam que, na Turquia, com a cultivar Muganli-57, também de hábito de crescimento ramificado e com 1 cápsula por axila foliar, a planta de gergelim é tolerante à falta de água no solo e que valores de eficiência de uso da água decrescem com o aumento da irrigação. Esses autores obtiveram, na média de 2 anos de estudos (2003 e 2004), valores de K_y para o gergelim iguais a 1,01 e a 0,54 respectivamente, com média de 0,65.

Chandrakar et al. (1994) observaram, na Índia, em um experimento com a cultivar de gergelim Selection 5 com tratamentos de irrigação (Kc-pan de 0,5 e 0,7 irrigando por todo o ciclo, até antes, durante ou depois das fases vegetativa e de floração) com base na evaporação do tanque Classe A, que a eficiência de uso de água ($0,5; 0,4$ e $0,3 \text{ kg m}^{-3}$) diminuiu com o aumento do volume de irrigação aplicado (234, 374 e 514 mm), respectivamente.

Silva (2012) concluiu, em estudo visando avaliar o crescimento e a capacidade produtiva de três genótipos de gergelim (BRS Seda, BRS 196 CNPA G4 e a linhagem ELAG09 – 27561) em função de lâminas de irrigação (47, 240, 477, 698 e 1026 mm), utilizando o sistema de irrigação por aspersão convencional fixa em linha central, em Barbalha, CE, que os maiores valores dos componentes de produção foram obtidos com a lâmina de 1026 mm e que o crescimento dos genótipos de gergelim foi afetado pelas diferentes lâminas de irrigação.

Bezerra et al. (2010) concluíram, em Casa de Vegetação da Universidade Federal de Campina Grande, PB - UFCG, objetivando avaliar a produção do gergelim BRS 196 CNPA G4 quando submetido a diferentes níveis de estresse hídrico (turnos de rega com base em coeficientes de depleção de água no solo de 0, 20, 40 e 60%) e doses de adubação, que o número de cápsulas e a produção por planta decresceram com o aumento do estresse hídrico (entre os tratamentos 40 e 60% de depleção).

3.5. Análise de crescimento

O monitoramento fenológico é ferramenta relevante para a predição da produção anual a fim de identificar os mecanismos regulatórios do ritmo periódico do crescimento (ABDULLA et al., 2011; LEELA et al., 2011).

Estudos relativos ao padrão fenológico de comunidades ou populações vegetais, fornecem informações sobre ritmos de crescimento e interação com o clima. Além disto, a avaliação do comportamento fenológico propicia o conhecimento e a definição das épocas em que ocorrem as diversas fases do crescimento e do desenvolvimento das plantas (FISCH et al., 2000).

Para isto são realizadas avaliações periódicas das estruturas das plantas (folhas, caules) e do tamanho da unidade fotossintetizadora (área foliar), durante o crescimento e o desenvolvimento (TAIZ e ZEIGER, 2009), tornando possível avaliar o crescimento e a produção final da planta (BENINCASA, 2003).

Em alguns casos a determinação da altura é suficiente mas, às vezes, maiores informações são necessárias como, por exemplo, o tamanho das folhas para cálculo da área foliar. A determinação da área foliar ocupa lugar de destaque uma vez que as folhas são as principais responsáveis pela captação da energia solar e pela produção de matéria seca, através da fotossíntese (FONTES et al., 2005; BARCELOS et al., 2007).

O crescimento vegetal pode, então, ser medido de diversas formas; neste sentido, a análise de crescimento objetiva descrever e interpretar o desempenho de determinada espécie crescendo em ambiente natural ou controlado (FONTES et al., 2005; BARCELOS et al., 2007). Apresenta-se, portanto, como uma técnica para estudo das bases fisiológicas da produção e destaca as influências ambientais, genéticas e agronômicas das variáveis (SILVA et al., 2000).

Vários estresses abióticos resultam em efeitos gerais e específicos sobre o crescimento; desta forma, plantas que crescem em condições limitantes de água apresentam crescimento limitado devido ao declínio da fotossíntese e à interferência na disponibilidade de nutrientes, resultados do processo de secagem do solo. A prevenção ao estresse osmótico causado pela seca depende do controle estomático e da maximização da absorção de água, por meio do crescimento de raízes (BRITO e BELTRÃO, 2011).

A análise de crescimento avalia, neste caso, a eficácia de manejos sendo amplamente usada por pesquisadores da área agrícola (CARDOSO et al., 2006).

Apesar de utilizar somente dados primários, o uso da análise de crescimento não destrutiva é uma ferramenta útil e eficiente na avaliação das culturas. Esta análise pode ser completa se taxas de crescimento também forem calculadas (CARDOSO et al., 2006).

3.6. Eficiência hídrica

Para sustentar o rápido crescimento da população mundial a produção agrícola terá de aumentar (HOWELL, 2001). Assim, métodos sustentáveis para aumentar a produtividade da água pelas culturas estão a ganhar importância em regiões áridas e semiáridas (DEBAEKE e ABOUDRARE, 2004).

Existe uma tendência natural de aumento do uso da água no futuro, seja pelo aumento populacional, culminando em maior necessidade por alimentos, seja pela disponibilidade de terras com aptidão para uso na agricultura irrigada. Sabe-se, também, que a agricultura é responsável por grande parcela da água utilizada no planeta (70,2%) (CHRISTOFIDIS, 2008). Assim, para alcançar o máximo de rendimento e lucro por hectare deve-se utilizar, eficientemente, a água disponível (UÇAN et al., 2007).

Tradicionalmente, a pesquisa agrícola tem focado sobremaneira na maximização da produção total. Nos últimos anos o foco também mudou para os fatores limitantes em sistemas de produção, nomeadamente a disponibilidade de terra ou água (GEERTS e RAES, 2009).

O uso eficiente da água de irrigação pode ser alcançado atuando-se: a) na estrutura de irrigação então existente, em termos de tipos de cultivo, de sistemas de irrigação e de gestão do uso de água; b) nos métodos de manejo da irrigação e, c) nas técnicas que permitam aumento da eficiência de uso de água (COELHO et al., 2005).

3.6.1. Eficiência de uso de água (EUA)

A produtividade da água pelas culturas ou eficiência de uso da água (EUA) é o termo chave na avaliação de estratégias de déficits de irrigação (DI). A produtividade da água com dimensões de kg m^{-3} é definida como a relação do rendimento atual (R_a) e do volume total de água consumido pela cultura (V) este se referindo à ET_c (à perda de água pela evapotranspiração da planta) ou ao volume de água aplicado à cultura (V) (DOORENBOS e KASSAM, 2000; ALLEN et al., 2006).

A otimização da eficiência de uso da água (EUA) de forma a contribuir para a sustentabilidade dos recursos hídricos pode ser alcançada aumentando-se o rendimento para uma mesma quantidade de água aplicada ou se reduzindo a lâmina aplicável (evapotranspiração) sem que ocorram perdas de maior magnitude no rendimento. Isto pode

ser feito, por exemplo, através da diminuição da frequência e/ou da antecipação do corte da irrigação (COELHO et al., 2005).

3.6.2. Fator de resposta ao estresse hídrico (Ky)

O fator de resposta das culturas ao estresse hídrico (Ky) é um parâmetro adimensional que relaciona o decréscimo relativo do rendimento $(1 - \frac{Y_a}{Y_m})$ de qualquer cultura (herbácea ou lenhosa) com o consumo relativo de água $(1 - \frac{ET_c}{ET_m})$. Este fator indica a tolerância de determinada cultura ao estresse hídrico (ALLEN et al., 2006; STEDUTO et al., 2012), sendo específico para qualquer cultura e condições de cultivo (STEDUTO et al., 2012).

O Ky capta a essência das ligações complexas entre rendimento e uso de água por uma cultura, em que muitos processos biológicos, físicos e químicos estão envolvidos. A relação tem mostrado validade e viabilidade notáveis para quantificar os efeitos do estresse hídrico sobre o rendimento (STEDUTO et al., 2012).

De acordo com Kirda et al. (1999) e Steduto et al. (2012) quando a cultura é muito sensível ao estresse hídrico ocorrem maiores reduções proporcionais no rendimento quando o consumo de água é reduzido devido ao déficit ($Ky > 1$); culturas mais tolerantes ao estresse apresentam menores reduções proporcionais no rendimento com a redução do consumo de água ($Ky < 1$).

Segundo Uçan et al. (2007), diferenças nos valores de Ky podem ser devidas às variações climáticas, às práticas culturais e aos métodos de irrigação.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Condução geral da área experimental

4.1.1. Local

O trabalho foi conduzido no Campo Experimental da Embrapa Algodão, localizado no município de Barbalha, CE (coordenadas geográficas: 07°19' S, 39°18' W e 409 m de altitude, em relação ao nível médio do mar – RAMOS et al., 2009), conforme visualizado nas Figura 03, no período de 04 de agosto a 07 de novembro de 2012.

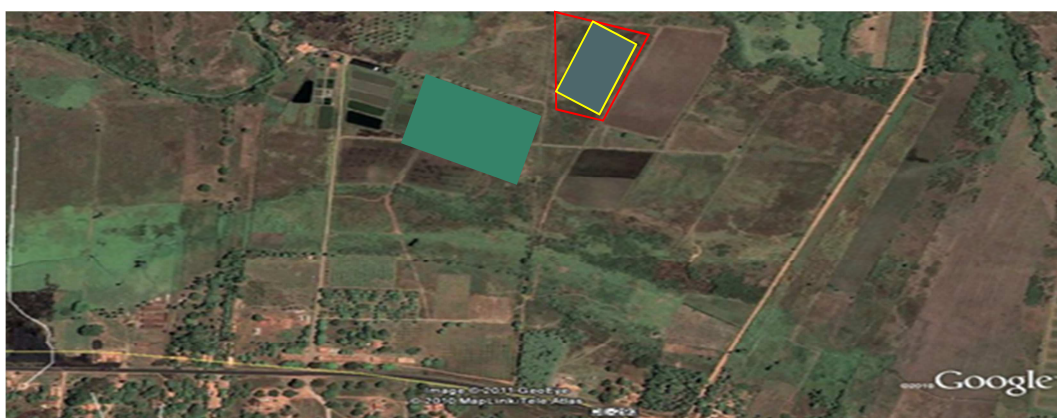


Figura 03. Imagem de satélite da localização da área experimental (retângulo com bordas amarelas). Barbalha, CE, 2011

Fonte: GOOGLEMAPS (2011)

O clima da região é, segundo a classificação de Koppen, do tipo Aw' (tropical chuvoso) com chuvas de verão (4 a 5 meses – de fevereiro a maio), índice hídrico (Im) do tipo semiárido (entre -20 e -40, conforme Thornthwaite) (SUDENE, 1973), médias de temperaturas máxima de 31,5°C e mínima de 20,5°C, de umidade relativa do ar de 84% e de precipitação média anual de 1001,4 mm (RAMOS et al., 2009). Os dados climáticos mensais do período de cultivo estão organizados na Tabela 01.

Tabela 01. Valores médios da pressão atmosférica (Press), temperatura média (T_méd), temperatura máxima (T_máx), temperatura mínima (T_mín), precipitação (P), umidade relativa do ar (UR) e insolação total (Ins) nos meses do estudo. Barbalha, CE, 2012

Dados meteorológicos							
Mês	Press (hPa)	T_méd (°C)	T_máx (°C)	T_mín (°C)	P (mm)	UR (%)	Ins (h)
Ago	969,3	19,2	32,9	25,5	0,0	52,8	293,5
Set	968,4	19,6	34,7	26,9	0,0	50,4	311,1
Out	965,6	21,5	35,5	28,0	6,1	54,3	303,5
Nov	964,2	22,6	35,7	28,5	25,6	61,5	246,3

FONTE: INMET (2013)

4.1.2. Solo e água

O solo da área experimental é do tipo Neossolo Flúvico (EMBRAPA, 2005). A caracterização química (camada de 0 - 20 cm do solo), realizada no Laboratório de Solos da Embrapa Algodão, Campina Grande, PB, está disposta na Tabela 02.

Tabela 02. Características químicas do solo (camada 0-20 cm) da área experimental. Barbalha, CE, 2012

Características	Valores
pH	6,80
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	12,30
Ca ² (mmol _c dm ⁻³)	95,50
Mg ² (mmol _c dm ⁻³)	49,20
Na (mmol _c dm ⁻³)	2,80
K (mmol _c dm ⁻³)	1,40
Al ³ (mmol _c dm ⁻³)	0,00
P (mg dm ⁻³)	5,40

A classificação textural e suas características físicas, procedidas no Laboratório de Irrigação e Salinidade da Universidade Federal da Paraíba – LIS/UFCG, Campina Grande, PB, nas camadas de 0 - 30 e de 30 – 60 cm do perfil do solo, respectivamente, estão descritas na Tabela 03.

Tabela 03. Caracterização física do solo da área experimental nas profundidades de 0-30 e 30-60 cm do perfil do solo. Barbalha, CE, 2012

Características	0 – 30 cm	30 – 60 cm
Areia (%)	33,67	59,98
Silte (%)	20,17	15,10
Argila (%)	46,16	24,92
Textura	Argilosa	Franco Argilo-Arenosa
Densidade aparente do solo (g cm ⁻³)	1,27	1,44
Densidade de partículas (g cm ⁻³)	2,72	2,72
Porosidade total (%)	53,30	47,04
Conteúdo de água a 10 KPa (m ³ m ⁻³)	0,46	0,32
Conteúdo de água a 33 KPa (m ³ m ⁻³)	0,35	0,25
Conteúdo de água a 100 KPa (m ³ m ⁻³)	0,29	0,18
Conteúdo de água a 500 KPa (m ³ m ⁻³)	0,23	0,12
Conteúdo de água a 1000 KPa (m ³ m ⁻³)	0,20	0,12
Conteúdo de água a 1500 KPa (m ³ m ⁻³)	0,18	0,10
Água disponível (m ³ m ⁻³)	0,17	0,15

A água utilizada na irrigação foi de um poço artesiano localizado próximo ao experimento, classificada pelo LIS/UFCG, Campina Grande, PB, como “C₂S₁” (Tabela 04) apresentando, assim, salinidade média e baixa concentração de sódio, podendo ser usada sempre na maioria dos solos quando houver uma lixiviação moderada de sais.

Tabela 04. Análise química da água utilizada na irrigação da área experimental. Barbalha, CE. 2012

Características	Valores
Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$ a 25 °C)	296,00
Potencial hidrogeniônico (pH)	7,00
Cloretos em Cl^- (mg L^{-1})	39,94
Sulfatos em SO_4^{2-} (mg L^{-1})	Traços
Alcalinidade de hidróxidos em CaCO_3 (mg L^{-1})	0,00
Alcalinidade de carbonato em CaCO_3 (mg L^{-1})	0,00
Alcalinidade em bicarbonato em CaCO_3 (mg L^{-1})	130,00
Cálcio em Ca^{++} (mg L^{-1})	25,00
Magnésio em Mg^{++} (mg L^{-1})	16,20
Sódio em Na^+ (mg L^{-1})	21,39
Potássio em K^+ (mg L^{-1})	4,29
Dureza total em CaCO_3 (mg L^{-1})	130,00
Relação de adsorção de sódio (RAS)	1
CLASSE	C ₂ S ₁

4.1.3. Delineamento experimental

O layout da área experimental e do sistema de irrigação e o detalhamento da parcela experimental podem ser visualizados nas Figuras 04 e 05, respectivamente.

O experimento foi instalado em blocos casualizados, com quatro tratamentos (T₁. 305 mm; T₂. 436 mm; T₃. 567 mm e T₄. 698 mm de lâmina líquida total de água aplicada no ciclo correspondendo, o tratamento T₃, a 100% da evapotranspiração da cultura - ETc), distribuídos em parcelas com três repetições, totalizando 12 parcelas experimentais, medindo 18 m x 12 m (216 m²) e cada bloco 12 m x 72 m (864 m²), com área útil por parcela de 14 m² (2 fileiras de 10,0 m de comprimento) e área total de 6912 m² (144 m x 48 m) (Figuras 04 e 05).

4.1.4. Plantio

O preparo do solo para a semeadura constou de uma aração com arado escarificador. A adubação, nas doses de 123-152-30 kg ha⁻¹, foi realizada conforme análise química do solo e seguindo recomendações de Cavalcanti et al. (1998).

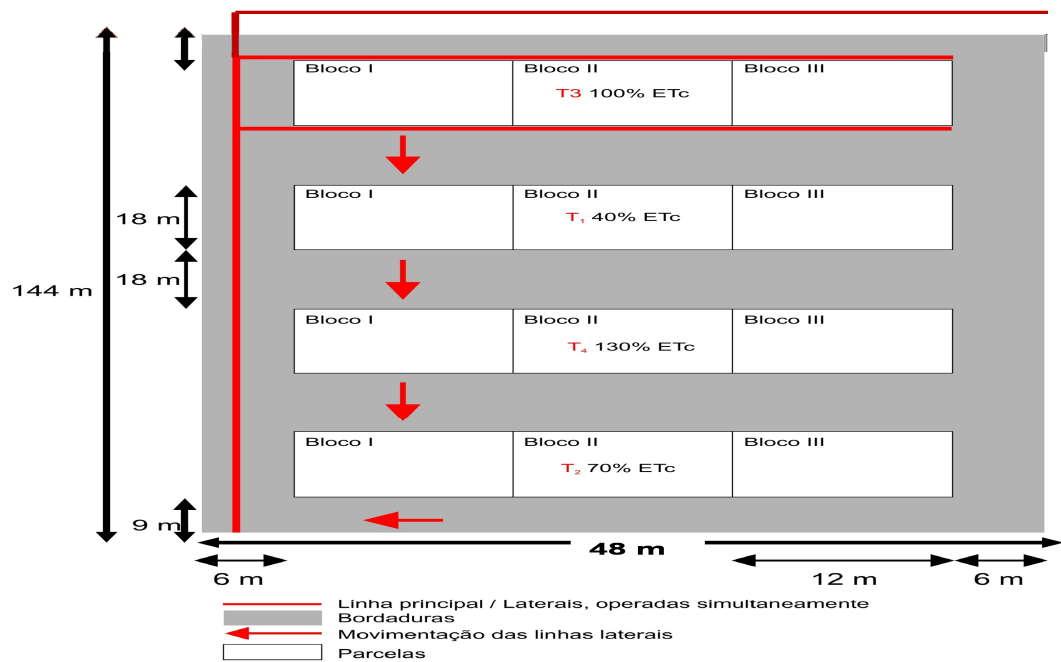


Figura 04. Layout da área experimental e do sistema de irrigação. Barbalha, CE, 2012

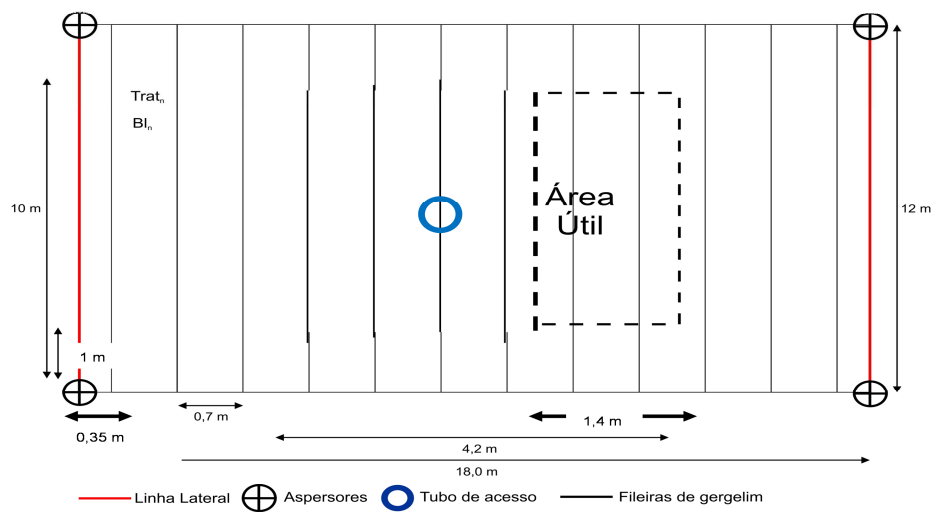


Figura 05. Detalhamento da parcela experimental visto por entre as duas linhas laterais de aspersores. Barbalha, CE, 2012

Utilizaram-se em fundação, 300 kg ha^{-1} do fertilizante Fosfato Monoamônico - MAP (11% de N e 46% de P_2O_5). O N foi fracionado em mais 2 coberturas (44,5% da dose após o desbaste e 44,5%, 25 dias depois) aplicando-se, a cada vez, 100 kg ha^{-1} do fertilizante nitrogenado Ureia (45% de N), enquanto todo o K foi aplicado após o desbaste,

na base de 50 kg ha⁻¹ de Cloreto de Potássio (60% de K₂O). A adubação de fundação foi feita mecanicamente, no fundo do sulco de plantio utilizando-se uma adubadora Super Tatu (Figura 06). As adubações de cobertura foram feitas em sulcos laterais às linhas de plantio.



Figura 06. Adubação de fundação e marcação das linhas de plantio (0,70 m entre fileiras de gergelim). Barbalha, CE, 2012

A semeadura foi realizada no dia 04 de agosto de 2012 com cinco sementes por cova na profundidade média de 2 cm utilizando-se a cultivar BRS 196 CNPA G4 (Figura 07), semeada no espaçamento de 0,70 m entre fileiras (Figura 06) com densidade de 5 a 10 plantas por metro linear. O desbaste foi feito em 2 etapas: a primeira, quando as plantas estavam com 4 folhas (pré-desbaste) e a segunda quando estavam com 15 cm de altura (desbaste definitivo). Só houve necessidade do controle de pragas, presença de formigas cortadeiras, até os 20 dias do ciclo da cultura. O controle de plantas daninhas foi efetuado com 3 capinas manuais.



Figura 07. Detalhes do A) caule, folhas, cápsulas, B) planta seca e sementes do gergelim BRS 196 CNPA G4. Barbalha, CE, 2012

4.2. Determinação da evapotranspiração de referência (ET_0) pelo método de Penman-Monteith

A ET_0 foi estimada diariamente, em todo o período experimental, pelo método de Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 2006), expresso pelas equações [2] e [3]:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (Rn-G) + \gamma \left(\frac{900}{T+273} \right) U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1+0,34 U_2)} \quad [2]$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27T}{T+237,3}\right) \right]}{(T+237,3)^2} \quad [3]$$

em que:

ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

Rn é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), considerado de valor insignificante quando se utiliza de cálculos diários;

T é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$);

U_2 é a velocidade média diária do vento, medida a 2 m de altura (m s^{-1});

e_s é a pressão média diária de saturação de vapor (kPa);

e_a é a pressão atual média diária de vapor (kPa);

Δ é a declividade da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), considerado constante ($\gamma = 0,0622 \text{ kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), pois é uma função da pressão atmosférica a qual varia muito pouco ao longo do ano (95,03 kPa) e também do calor latente de evaporação da água, que é pouco afetado pela temperatura, sendo recomendado valor médio igual a $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$.

Os dados climáticos utilizados na equação foram obtidos da Estação Meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, em Barbalha, CE, distante 500 m da área experimental.

A cada evento de irrigação (I) o volume de reposição de água (LL) no tratamento de irrigação correspondente a 100% da ET_c foi calculado pela equação [4] (DOOREMBOS e KASSAM, 2000; ALLEN et al., 2006):

$$LL = ET_0 Kc = ET_c \quad [4]$$

onde:

LL , lâmina líquida de reposição (mm),

ET_0 , evapotranspiração de referência do período, estimada pelo Método de Penman-Monteith,

Kc , coeficiente de cultivo do gergelim da respectiva fase fenológica do dia da irrigação, e

ET_c , evapotranspiração da cultura, calculada.

Para os cálculos da lâmina líquida (LL) de reposição, os coeficientes de cultivo (Kc) para as diversas fases fenológicas da cultura foram obtidos a partir da recomendação proposta por Allen et al. (2006) para as fases III (Floração) e IV (Maturação) enquanto que para a fase I (Estabelecimento) o valor do Kc -inicial foi calculado por meio do ajuste, proposto por Albuquerque et al. (2002), nas curvas do modelo gráfico de Doorembos e Pruitt (1997):

$$Kc_{inicial} = 1,41704 - 0,092412ET_0 - 0,11001F + 0,0042672ET_0^2 + 0,0033743F^2 + 0,00028724ET_0F \quad [5]$$

onde:

ET_0 , evapotranspiração de referência ($mm\ d^{-1}$) na época da Fase I; e,

F , Frequência ou turno de irrigação na Fase I (Dias).

O cálculo dos Kc -intermediários (fase II - Crescimento) e dos Kc -finais (fase IV - Maturação) para o gergelim, no dia do evento de irrigação, foi feito através da equação linear da reta a qual representa fielmente, segundo Allen et al. (2006), a variação de Kc ao longo dessas fases.

Assim, nas fases fenológicas do gergelim diferenciadas e estabelecidas a campo conforme orientações de Doorembos e Pruitt (1997) utilizou-se, para cálculo da lâmina líquida de reposição (LL) via irrigação, dos coeficientes de cultivo (Kc) médios, distribuídos a seguir:

Fase I – Estabelecimento – período compreendido entre a emergência e 10% de cobertura de solo (2 a 5 Dias Após a Emergência - DAE): 0,63 (Kc -inicial);

Fase II – Crescimento – período compreendido entre 10% de cobertura do solo ao início da floração (6 a 32 DAE): 0,79 (Kc-intermediário);

Fase III – Floração – período compreendido entre a floração e o início da maturação (33 a 66 DAE): 1,10 (Kc-médio) e;

Fase IV – Maturação – período compreendido do início ao final da maturação (67 a 90 DAE): 0,25 (Kc-final).

A diferenciação dos tratamentos de irrigação foi iniciada aos 13 DAE (22/08/2012). A partir desta data até a última irrigação, para os demais tratamentos de irrigação a lâmina líquida de reposição (LL) calculada para o tratamento de irrigação baseado em 100% da ET_c, foi multiplicada por 0,4; 0,7 e 1,3 obtendo-se os volumes de reposição correspondentes aos tratamentos de irrigação com 40, 70 e 130% da ET_c.

As irrigações foram efetuadas por um sistema de aspersão convencional móvel, com eficiência de 75% utilizando-se aspersores com bocais de 5,0 mm x 4,6 mm trabalhando com uma pressão de serviço de 0,34 MPa, precipitação média de 10,54 mm h⁻¹, espaçados 18 m x 12 m aplicando-se água na camada de 0 a 0,40 m do solo que, segundo Amaral e Silva (2008), corresponde ao perfil do solo atingido pelo sistema radicular do gergelim.

O teste de uniformidade de aplicação de água foi realizado em 09/08/2012 (terreno limpo, antes da germinação), nos quatro tratamentos de irrigação utilizando-se 24 pluviômetros por teste, distribuídos em espaçamentos iguais (3 m x 3 m) dentro da área coberta por 4 aspersores (Figura 06), conforme metodologia de Gomes (1994), de onde a precipitação média dos aspersores utilizados foi determinada.

Antes do plantio foi efetuada uma irrigação em toda a área, de modo a elevar o conteúdo de água no solo à capacidade de campo e favorecer a germinação. Posteriormente, as irrigações foram realizadas a cada 3 ou 4 dias, de acordo com os tratamentos, devido a textura argilosa do solo da área favorecer uma infiltração muito baixa de água no solo [$< 24 \text{ mm d}^{-1}$, segundo Reichardt (1987)]. A partir do início da fase de maturação (67 Dias Após a Emergência - DAE), as irrigações passaram a ser semanais visto os menores quantitativos de reposição requeridos pela cultura por irrigação.

4.3. Determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) pelo método do balanço hídrico no solo

O estudo do balanço hídrico no solo foi realizado nas parcelas irrigadas com 100% da ET_c correspondendo a lâmina líquida total aplicada no ciclo de 567 mm. O

período de estudo foi de 10/08/2012 (2º dia após a emergência – DAE) a 07/11/2012 (90º DAE), totalizando 89 dias.

A ETc foi calculada pela Equação [6], proveniente da equação padrão do balanço hídrico do solo (CINTRA et al., 2000; REICHARDT e TIMM, 2012):

$$ETc = (P + I) \pm Fv \pm Es \pm Ess \pm \Delta h \pm \Delta p \quad [6]$$

em que:

ETc - evapotranspiração atual da cultura no período considerado (Δt) (mm d^{-1});

P - precipitação pluvial em Δt (mm d^{-1});

I - irrigação (mm d^{-1});

Fv - drenagem profunda (DP) ou ascensão capilar (AC) em Δt (mm d^{-1});

Es – Escoamento superficial em Δt (mm d^{-1});

Ess - Escoamento subsuperficial em Δt (valores mínimos, considerados somente em áreas com solo de alta declividade) (mm d^{-1});

Δh - variação do armazenamento de água no perfil do solo em Δt na camada 0 – L (cm) da profundidade efetiva das raízes da cultura no solo (mm d^{-1}); e,

Δp - variação do conteúdo de água da planta em Δt (mm d^{-1}).

As curvas de retenção do conteúdo de água no solo (Figura 08), obtidas a partir dos dados de laboratório do potencial matricial (kPa) e do conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do solo, para as profundidades de 0-30 e 30-60 cm (Tabela 03) foram determinadas no LIS/UFMG, Campina Grande, PB usando-se o extrator de Richards.

Os dados das curvas de retenção do conteúdo de água no solo foram ajustados por regressão polinomial, conforme modelo de van Genuchten (1980), determinado pelo software SWRC (Soil Water Retention Curve - versão Beta 3.0 – DOURADO NETO et al., 2000), estando os parâmetros obtidos organizados na Tabela 05.

A condutividade hidráulica ($K_0 - \text{mm d}^{-1}$) foi determinada através de testes de infiltração em diferentes pontos da área experimental com infiltrômetros de anel de 25 e 50 cm de diâmetro, ambos com 30 cm de altura e 15 cm enterrados na superfície do solo, conforme metodologia descrita por Bernardo et al. (2009). A condutividade hidráulica do solo foi considerada igual à média das velocidades de infiltração básica (VIB) dos testes (Tabela 05).

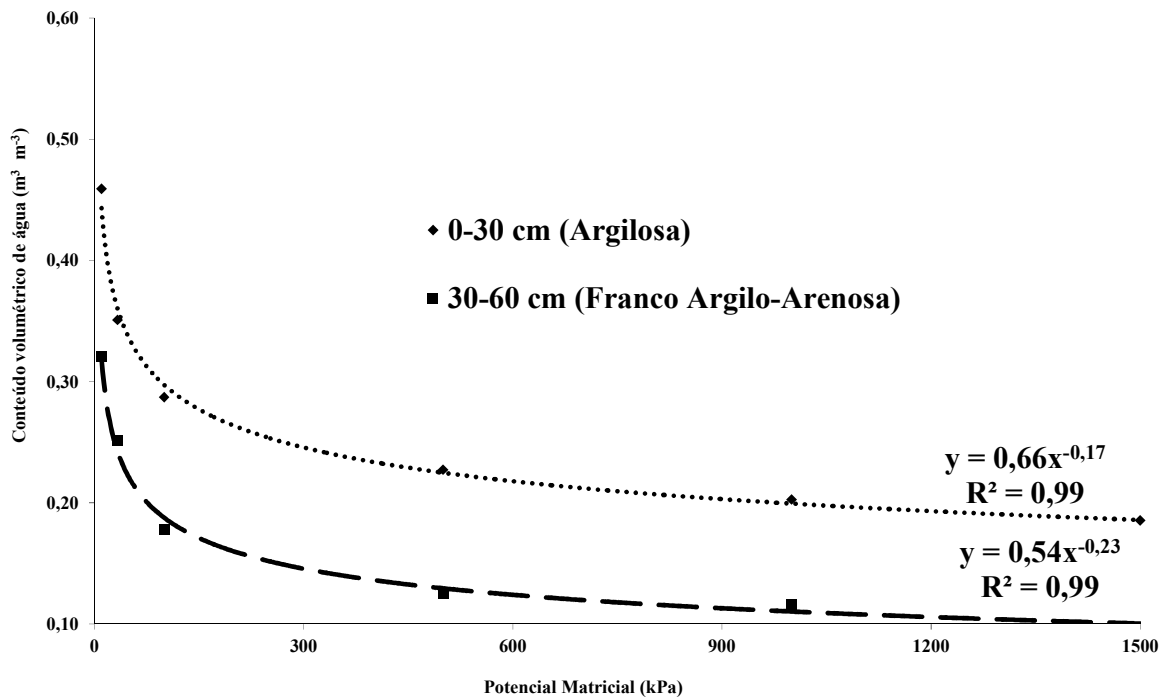


Figura 08. Curvas de retenção do conteúdo de água do solo da área experimental nas profundidades de 0-30 e 30-60 cm do perfil do solo. Barbalha, CE, 2012

Tabela 05. Valores dos parâmetros de ajuste das curvas de retenção do conteúdo de água no solo e da condutividade hidráulica, determinados nas profundidades de 0-30 e de 30-60 cm do perfil do solo da área experimental. Barbalha, CE, 2012

Parâmetros	0 – 30 cm	30 – 60 cm
α	1,4690	0,0693
m	0,0947	0,0728
n	2,9170	5,3548
θ_r	0,0950	0,0560
θ_s	0,8600	0,3240
K_0	19,1690	19,1690

θ_s = conteúdo de água de saturação ($m^3 m^{-3}$); θ_r = conteúdo de água residual ($m^3 m^{-3}$); α , m e n = parâmetros das curvas de retenção do conteúdo de água no solo (adimensionais), desde que $\theta \ll 1$, $\theta < m < 1$ e $n > 1$; K_0 = condutividade hidráulica ($mm d^{-1}$)

As leituras do conteúdo volumétrico de água do solo, a cada 0,10 m, até a profundidade de 0,50 m, foram obtidas com uma sonda Diviner 2000® (SENTEK, 2000), inserida no solo através de um tubo de acesso instalado nas parcelas experimentais (Figuras 05 e 09).

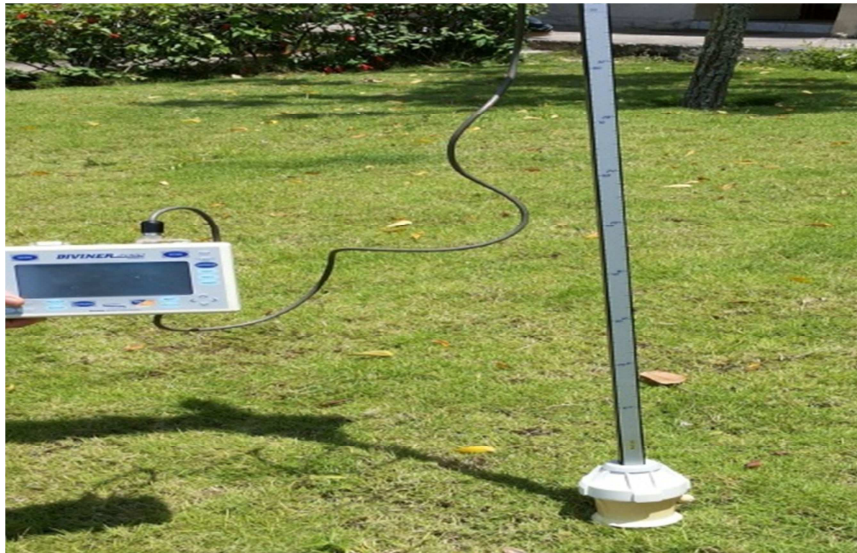


Figura 09. Datalogger, haste graduada com sensores e introdução da sonda no tubo de acesso para leitura do conteúdo de água no solo a diferentes profundidades. Barbalha, CE. 2012

Como nesta sonda não há exatidão nos valores da contagem da frequência, foi feita a normalização desta medida que consistiu, primeiro, em registrar leituras dentro de um tubo de PVC exposto separadamente do ar e da água, tomando-se os dados em frequência relativa (FR) e em seguida esses valores de FR foram convertidos em altura de água (mm) para cada camada de solo com a equação de calibração da sonda, essa apresentada na Figura 10.

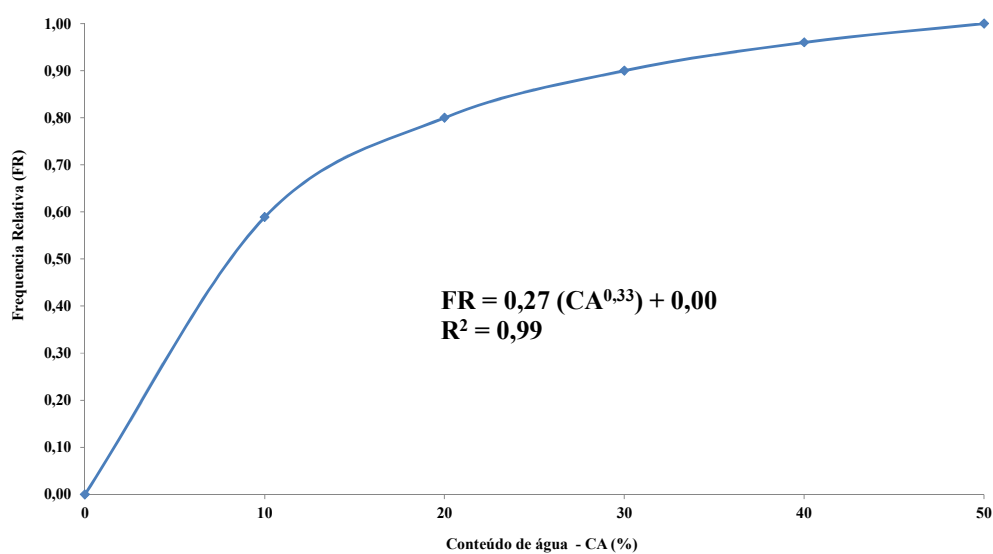


Figura 10. Equação de calibração da sonda Diviner 2000®

Fonte: SENTEK (2000)

Os valores do conteúdo volumétrico de água no solo foram utilizados nos cálculos dos fluxos de drenagem e da variação do armazenamento de água do balanço hídrico no solo.

A drenagem de água no solo - DP [fluxo de água (Fv) negativo] ou a ascensão capilar - AC [fluxo de água (Fv) positivo] foram calculadas pela equação de Darcy-Buckingham, simplificada por Reichardt e Timm (2012), conforme Equação [7]. A drenagem foi considerada como a água percolada abaixo da zona de contingência das raízes da cultura (camada de 0,30 a 0,50 m).

$$Fv = -\bar{K}(\theta) \frac{\Delta Ht}{\Delta z} \quad [7]$$

em que:

$\bar{K}(\theta)$ é a condutividade capilar, em função do conteúdo de água no solo (mm d^{-1}), e $\frac{\Delta Ht}{\Delta z}$, o gradiente de potencial total de água no solo.

A condutividade capilar [$\bar{K}(\theta)$] foi determinada pela Equação [8], segundo van Genutchen (1980):

$$\bar{K}(\theta) = K_0 \omega \left[l - \left(l - \omega^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad [8],$$

em que:

$\bar{K}(\theta)$ é a condutividade capilar (mm d^{-1}),

K_0 é a condutividade hidráulica do solo saturado (mm d^{-1})

$\omega = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$,

$\theta = \frac{\theta_{(L-z)ti} + \theta_{(L+z)ti} + \theta_{(L-z)tf} + \theta_{(L+z)tf}}{4}$, ou seja, o conteúdo médio de umidade entre as

profundidades do solo de $L - z$ e $L + z$ (cm),

θ é o conteúdo atual de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$),

$\theta_{(L-z)tf}$ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em $L - z$ (cm) no tempo final (tf),

$\theta_{(L+z)tf}$ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em $L + z$ (cm) no tempo final (tf),

$\theta_{(L-z)ti}$ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em $L - z$ (cm) no tempo inicial (ti),

$\theta_{(L+z)ti}$ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em $L + z$ (cm) no tempo inicial (ti),

L é a profundidade efetiva das raízes (cm),

z (valor negativo) é o múltiplo das profundidades (cm) cujos conteúdos volumétricos de água ($m^3 m^{-3}$) foram medidos,

θ_r é o conteúdo volumétrico de água residual ($m^3 m^{-3}$),

θ_s é o conteúdo de água de saturação ($m^3 m^{-3}$),

l é um parâmetro empírico com valor igual a 0,5 para a maioria dos solos, e

m e n são parâmetros das curvas de retenção de água no solo (adimensionais) desde que $\theta \ll 1$, $\theta < m < 1$ e $n > 1$, conforme modelo de van Genuchten (1980).

A variação do potencial total de água no solo (ΔH_t) e do armazenamento (Δh) da água do solo foram obtidas através de integrações numéricas utilizando-se o método gráfico trapezoidal, conforme Reichardt e Timm (2012), na profundidade de 0 a 0,50 m do solo, representado na Figura 11, que mostra os componentes utilizados no balanço hídrico no solo sendo as equações, para cálculo desses componentes, as seguintes:

$$|\Psi_m| = \frac{\left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r}\right)^{\frac{1}{m}} - 1\right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad [9],$$

$$H = \Psi_m + z \quad [10],$$

$$\frac{\Delta H_t}{\Delta z} = \frac{\frac{H_{(L-z)ti} + H_{(L-z)tf}}{2} - \frac{H_{(L+z)ti} + H_{(L+z)tf}}{2}}{\Delta z} \quad [11],$$

e

$$\Delta h = \left(\overline{\sum_L^0 \theta_{tf}} - \overline{\sum_L^0 \theta_{ti}} \right) \Delta z \quad [12].$$

nos quais:

$\bar{K}(\theta)$ é a condutividade capilar ($mm d^{-1}$),

K_0 é a condutividade hidráulica do solo saturado ($mm d^{-1}$),

L é a profundidade efetiva das raízes (cm),

z (valor negativo) é o múltiplo das profundidades (cm) cujos conteúdos volumétricos de água ($m^3 m^{-3}$) foram medidos,

$\theta_{(L-z)tf}$ é o conteúdo volumétrico de água ($m^3 m^{-3}$) em L - z (cm) no tempo final (tf),

$\theta_{(L+z)tf}$ é o conteúdo volumétrico de água ($m^3 m^{-3}$) em L + z (cm) no tempo final (tf),

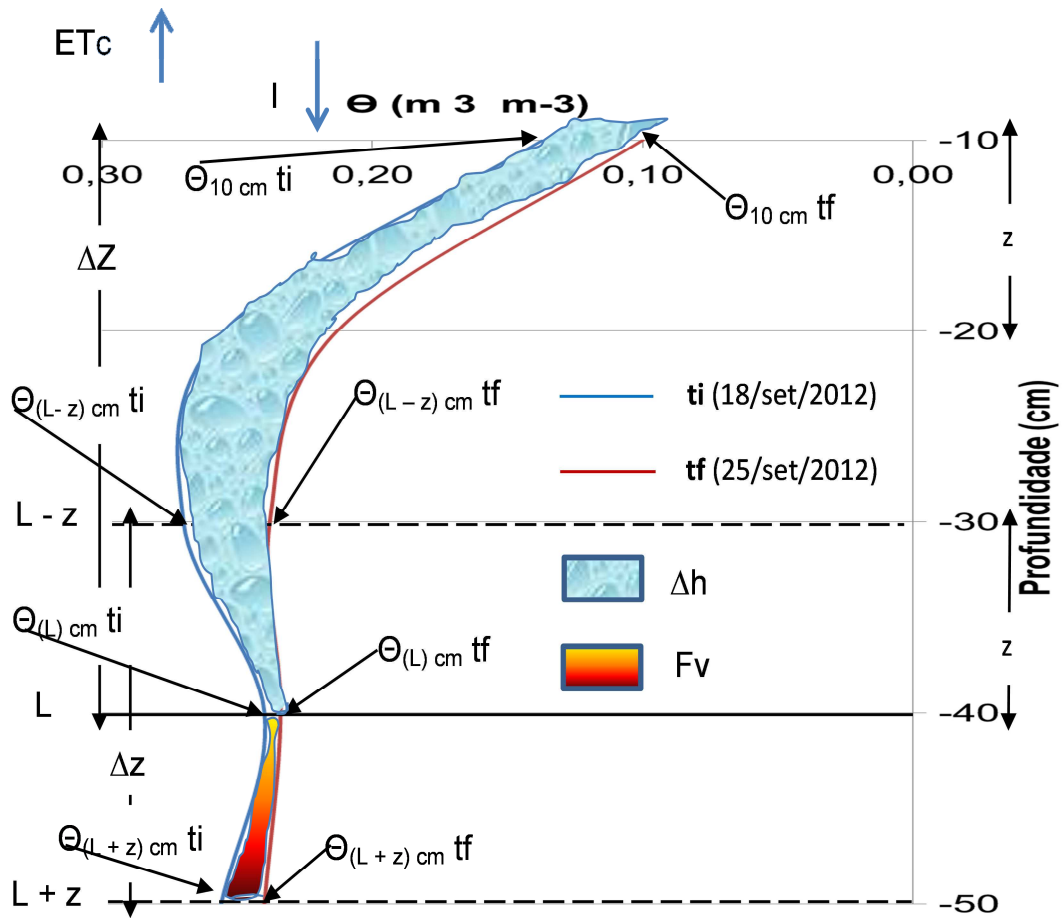


Figura 11. Perfil do conteúdo de água no solo para duas medições no tempo. Barbalha, CE, 2012

$\theta_{(L-z)ti}$ é o conteúdo volumétrico de água ($m^3 m^{-3}$) em $L - z$ (cm) no tempo inicial (ti),

$\theta_{(L+z)ti}$ é o conteúdo volumétrico de água ($m^3 m^{-3}$) em $L + z$ (cm) no tempo inicial (ti),

ΔH_t é a variação do potencial total de água de $L - z$ a $L + z$ (cm) do solo,

$H_{(L-z)ti}$ é o potencial total de água no solo na profundidade $L - z$ (cm) no tempo inicial,

$H_{(L-z)tf}$ é o potencial total de água no solo na profundidade $L - z$ (cm) no tempo final,

$H_{(L+z)ti}$ é o potencial total de água no solo na profundidade $L + z$ (cm) no tempo inicial,

$H_{(L+z)tf}$ é o potencial total de água no solo na profundidade $L + z$ (cm) no tempo final,

Δz é a variação da profundidade entre $L - z$ e $L + z$ (cm) para os fluxos de drenagem,

ΔZ é a variação da profundidade de $0,0 - L$ (cm) para a variação do armazenamento de água no solo (Δh),

$(\overline{\sum_L^0 \theta_{tf}})$ é a média dos conteúdos volumétricos de água ($m^3 m^{-3}$) medidos a cada z , de $0,0$ a L (cm) de profundidade, no tempo final (tf),

$(\overline{\sum_L^0 \theta_{t_i}})$ é a média dos conteúdos volumétricos de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) medidos a cada z , de 0,0 a L (cm) de profundidade, no tempo inicial (t_i),

Ψ_m é o potencial matricial (kPa),

θ_r é o conteúdo volumétrico de água residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$),

θ_s é o conteúdo de água de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), e

α , m e n são parâmetros das curvas de retenção de água no solo (adimensionais) desde que $\theta \ll 1$, $\theta < m < 1$ e $n > 1$, conforme modelo de van Genuchten (1980).

A variação de armazenamento da água do solo ($\Delta h - \text{mm d}^{-1}$), determinada pela diferença das médias dos valores do conteúdo volumétrico de água obtidos no perfil nos tempos inicial e final de cada período considerado (Δt), foi medida na camada de profundidade de 0 a 0,40 m (0 a L cm), profundidade efetiva das raízes do gergelim.

4.4. Estimativas do coeficiente de cultivo (K_c)

As estimativas do K_c foram conduzidas, por fase fenológica, pela relação entre os valores da evapotranspiração da cultura (ET_c), obtidos pelo balanço hídrico no solo (REICHARDT e TIMM, 2012), e os da evapotranspiração de referência (ET_0), estimados pelo método FAO-Penman-Monteith (ALLEN et al., 2006), através da Equação [13]:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad [13]$$

4.5. Análise de crescimento

Periodicamente, a partir dos 27 Dias Após a Emergência (DAE), a cada 20 dias, foram medidos, em 4 plantas por parcela devidamente identificadas desde o início das medições, a altura, o diâmetro caulinar e a área foliar:

a) Altura da planta ($A - \text{cm}$)

Determinada medindo-se, em centímetros, usando-se uma fita métrica, a distância compreendida entre a base da planta até seu ponteiro principal.

b) Diâmetro caulinar ($DC - \text{mm}$)

Medido, em milímetros, com um paquímetro digital, na parte inferior do caule da planta, a 1 cm da superfície do solo.

c) Área Foliar ($A_f - \text{cm}^2$)

Determinada medindo-se, com uma régua graduada, o comprimento médio longitudinal (C) de 10 folhas (SEVERINO et al, 2002), localizadas nos nós caulinares da planta aplicando-se a Equação $S = 0,3552C^2$ (SILVA et al., 2002, em que S = área foliar por folha - cm^2 e C = comprimento longitudinal da folha - cm). A área foliar média multiplicada pelo número total de folhas da planta, permitiu obter-se a área foliar total por planta ($A_f - \text{cm}^2$).

Com base nas medidas da altura, do diâmetro caulinar e da área foliar em cada intervalo de tempo considerando-se informações de Reis e Muller (1978) e usando equações adaptadas de Silva et al. (2000), foram estimadas as taxas de crescimento absoluto e relativo da altura, do diâmetro caulinar e da área foliar e o índice de área foliar:

d) Taxa de Crescimento Absoluto da Altura (TCAA - cm d^{-1})

É a variação ou incremento entre duas alturas da planta ao longo de determinado período de tempo. É uma medida que pode ser usada para se ter ideia da velocidade média de crescimento da planta em altura ao longo do período de observação.

$$\text{TCAA} = \frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1} \quad [14]$$

onde: A_1 é a altura da planta no tempo t_1 e A_2 , a altura da planta no tempo t_2 .

e) Taxa de Crescimento Relativo da Altura (TCRA - $\text{cm cm}^{-1} \text{d}^{-1}$)

A TCRA expressa o incremento da altura da planta por unidade de altura inicial, em um intervalo de tempo. É apropriada para avaliação do crescimento vegetal em altura que é dependente da altura acumulada gradativamente. Mensura o que a planta cresceu por dia em altura, por unidade de altura já existente.

$$\text{TCRA} = \frac{\ln A_2 - \ln A_1}{t_2 - t_1} \quad [15]$$

f) Taxa de Crescimento Absoluto do Diâmetro Caulinar (TCADC - cm d^{-1})

É a variação ou incremento entre dois diâmetros da planta ao longo de determinado período de tempo. Esta medida também pode ser usada para se ter ideia da velocidade média de crescimento em diâmetro caulinar, ao longo do período de observação.

$$TCADC = \frac{DC_2 - DC_1}{t_2 - t_1} \quad [16]$$

onde: DC_1 é o diâmetro caulinar medido no tempo t_1 e DC_2 , o diâmetro caulinar medido no tempo t_2 .

g) Taxa de Crescimento Relativo do Diâmetro Caulinar (TCRDC – $\text{cm cm}^{-1} \text{d}^{-1}$)

A TCRDC expressa o incremento do diâmetro caulinar da planta por unidade de diâmetro caulinar inicial em um intervalo de tempo; também é apropriada para avaliação do crescimento vegetal em diâmetro caulinar, que é dependente do diâmetro caulinar acumulado gradativamente; mensura o que a planta cresceu por dia em diâmetro caulinar, por unidade de diâmetro caulinar já existente.

$$TCRDC = \frac{\ln DC_2 - \ln DC_1}{t_2 - t_1} \quad [17]$$

h) Taxa de Crescimento Absoluto da Área Foliar (TCAAF – $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$)

É a variação ou incremento entre duas áreas foliares da planta ao longo de um período de tempo. É uma medida que pode ser usada para se ter ideia da velocidade média de crescimento em área foliar, ao longo do período de observação.

$$TCAAF = \frac{A_{f2} - A_{f1}}{t_2 - t_1} \quad [18]$$

onde: A_{f1} é a área foliar por planta no tempo t_1 e A_{f2} , a área foliar por planta no tempo t_2 .

i) Taxa de Crescimento Relativo da Área Foliar (TCRAF – $\text{cm}^2 \text{cm}^{-2} \text{d}^{-1}$)

A TCRF expressa o incremento da área foliar da planta por unidade de área foliar inicial em um intervalo de tempo; apropriada para avaliação do crescimento vegetal em área foliar que é dependente da área foliar acumulada gradativamente; mensura o que a planta cresceu por dia em área foliar por unidade de área foliar já existente.

$$\text{TCRAF} = \frac{\ln A_{f2} - \ln A_{f1}}{t_2 - t_1} \quad [19]$$

O Índice de Área Foliar (IAF – m² de área foliar por m² de área do solo) foi calculado pela equação [20]:

$$\text{IAF} = \frac{A_f}{S} \quad [20]$$

onde: A_f é a área foliar média de uma planta (m²) e S é a área do solo ocupada pela planta (m²).

4.6. Componentes da produção

Na colheita (90 DAE), foi contado o número de cápsulas (NC) ou de frutos por planta; ao mesmo tempo foi determinado o rendimento médio de sementes (R – kg ha⁻¹) e coletadas amostras de sementes por parcela para determinação do seu teor de óleo (O - %) em Laboratório.

a) Número de cápsulas (NC) ou de frutos por planta

Resultado da contagem do seu total por planta.

b) Rendimento de sementes (R)

Determinado pela pesagem (gramas) das sementes de cada área útil da parcela experimental, convertendo-se para kg ha⁻¹.

c) Teor de óleo (O) das sementes

Determinado no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da Embrapa Algodão, em Campina Grande, PB, conforme método não destrutivo de ressonância magnética -

RMN descrito por AOAC (1982), em amostras de 0,5 kg de sementes coletadas por parcela, no experimento de campo.

4.7. Eficiência hídrica

Após a colheita e se utilizando dados de rendimento de sementes do gergelim e dos volumes de água aplicados ao gergelim em cada tratamento de irrigação, foram determinados a eficiência de uso de água (EUA) e o fator de resposta ao estresse hídrico (K_y):

a) Eficiência de uso da água (EUA – kg m^{-3})

Determinada, conforme Doorembos e Kassam (2000) e Allen et al. (2006), pela relação entre o rendimento (R - kg ha^{-1}) do gergelim em sementes e o volume de água aplicado (V - $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) a cada tratamento de irrigação dado à cultura, conforme equação [21]:

$$EUA = \frac{R}{V} \quad [21]$$

b) Fator de resposta ao estresse hídrico (K_y)

Estimado, segundo FAO-33 (DOOREMBOS e KASSAM, 2000), FAO-56 (ALLEN et al., 2006) e FAO-66 (STEDUTO et al., 2012), pela razão entre o decréscimo relativo do rendimento ($1 - \frac{Y_a}{Y_m}$) e o decréscimo relativo da irrigação ($1 - \frac{ET_c}{ET_m}$), conforme equação [22]:

$$K_y = \frac{\left[1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right]}{\left[1 - \frac{ET_c}{ET_m}\right]} \quad [22]$$

em que:

K_y é o fator de resposta ao estresse hídrico, definido como o decréscimo no rendimento com relação ao decréscimo na lâmina de irrigação aplicada (adimensional);

Y_a é o rendimento em determinada lâmina de irrigação aplicada (kg ha^{-1});

Y_m é o rendimento máximo (kg ha^{-1});

$\frac{Y_a}{Y_m}$ é o rendimento relativo (adimensional);

$1 - \frac{Y_a}{Y_m}$ é o decréscimo no rendimento relativo (adimensional);

ET_c é a lâmina de irrigação aplicada que acarreta no rendimento Y_a (mm);

ET_m é lâmina máxima de irrigação aplicada (mm);

$\frac{ET_c}{ET_m}$ é a lâmina de irrigação relativa (adimensional);

$1 - \frac{ET_c}{ET_m}$ é o decréscimo relativo na lâmina de irrigação aplicada (adimensional).

4.8. Análises estatísticas

A evapotranspiração de referência (ET_0), os componentes do balanço hídrico do solo, os coeficientes de cultivo (K_c) e o fator de resposta ao déficit hídrico (K_y) não foram analisados estatisticamente por serem oriundos de métodos e equações próprias.

As variáveis relacionadas à análise do crescimento (em altura da planta, em diâmetro caulinar e em área foliar da planta; taxas de crescimento absoluto e relativo da altura, do diâmetro caulinar e da área foliar; índice de área foliar), de cada tratamento de irrigação ($Y_{305\text{ mm}}, \dots, Y_{698\text{ mm}}$), foram submetidas a diversas funções lineares (polinomiais: linear, quadrática, cúbica e inversa de 1ª a 3ª ordem) e não lineares (Sigmoidal: sigmóide, logístico, weibull, gompertz, hill e chapman; Peak: log Normal, gaussiana, gaussiana modificada, lorentzian, pseudo-voight, weibull; etc), a 1 e 5% de probabilidade. Os dados médios observados dessas variáveis foram ajustados apenas às funções não lineares Sigmoidal-logístico (Equação [23]) e Peak-log Normal (Equação [24]), aplicadas aos dados pelo software estatístico Sigma Plot (SIGMA PLOT, 2011).

$$Y_j = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b} \quad [23]$$

e

$$Y_j = \frac{a}{x} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln\left(\frac{x}{x_0}\right)}{b} \right)^2 \right] \quad [24]$$

onde:

“ Y_j ” é a variável sendo analisada para cada tratamento “ j ” de irrigação ($Y_{305\text{ mm}}, \dots, Y_{698\text{ mm}}$),

“ x ” é o número de dias após a emergência (DAE) das plantas,

“ x_0 ”, “ a ” e “ b ”, são os parâmetro dos modelos da função ajustada, sendo:

“ x_0 ”, o ponto de inflexão da equação,

“ a ” = $y_{\text{máx}} - y_{\text{mín}}$,

“ b ”, parâmetro de ajuste da equação.

As variáveis relacionadas aos componentes da produção (número de cápsulas por planta, rendimento e teor de óleo das sementes) e a eficiência de uso da água (EUA) foram submetidas à análise de variância, pelos testes F e de regressão polinomial, ambos a 1 e 5% de probabilidade utilizando-se o software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Evapotranspiração de referência (ET₀) calculadas pelo método de Penman-Monteith

As estimativas totais e as médias diárias de ET₀ por fase fenológica calculadas pelo método de Penman-Monteith durante o período experimental, estão apresentadas na Tabela 06.

Tabela 06. Evapotranspiração de referência (ET₀) calculadas pelo método de Penman-Monteith, durante o período experimental. Barbalha, CE, 2012

Períodos (Dias após a emergência)	Dias	Evapotranspiração de referência (ET ₀)	
		Total (mm)	Diária (mm d ⁻¹)
2° ao 5° (Estabelecimento)	4	31,3	7,8
6° ao 32° (Crescimento)	27	208,8	7,7
33° ao 66° (Floração)	34	270,0	7,9
67° a 90° (Maturação)	24	193,7	8,1
Total	89	703,8	-

Os valores médios diários variaram de 7,7 a 8,1 mm d⁻¹ (Tabela 06), estando dentro da faixa de valores previstos pela FAO (Allen et al., 2006) para regiões tropicais e subtropicais áridas e semiáridas de temperatura média superior a 30 °C, a mesma do local do experimento.

Esses resultados se assemelham aos obtidos pelo método de Penman-Monteith, por Amaral e Silva (2008), no mesmo local, e por Ahmed e Mahmoud (2010), no Sudão, continente africano, em condições climáticas semiáridas similares às da presente pesquisa, inclusive época de cultivo, em duas safras sucessivas (2001/02 e 2002/03) (8 e 7 mm d⁻¹, respectivamente).

5.2. Evapotranspiração da cultura (ET_c) do gergelim determinada pelo balanço hídrico no solo

Durante o período de realização do balanço de água no solo não houve precipitação (P) (Tabela 01). O escoamento superficial (Es) e o subsuperficial (Ess) foram negligenciados, visto a área do experimento ser plana. A variação do conteúdo de água na planta (Δp) tampouco foi considerada, por ser normalmente mínima.

O balanço hídrico no solo cultivado com gergelim, durante o período de estudo, é apresentado na Tabela 07.

Tabela 07. Balanço hídrico no solo cultivado com gergelim, durante o período de estudo. Barbalha, CE, 2012

Períodos (Dias após a emergência)	Dias	I	DP	Δh	ETc	ETc
		(mm)			(mm d ⁻¹)	
2° ao 5° dia (Estabelecimento)	4	19,8	1,00	-4,7	14,1	3,5
6° ao 32° dia (Crescimento)	27	127,7	31,2	33,0	129,5	4,8
33° ao 66° dia (Floração)	34	266,0	76,4	72,3	261,9	7,7
67° a 90° dia (Maturação)	24	114,5	2,6	-1,5	110,4	4,6
TOTAL	89	528,0	111,2	99,1	515,9	-

I = irrigação; DP = drenagem; AC = ascensão capilar; Δh = variação do armazenamento de água no solo; ETc = Evapotranspiração da cultura

Com respeito à irrigação observa-se, na fase de Floração da cultura, que se necessitaram de maiores volumes (266 mm), justamente em virtude dos maiores requerimentos de água da cultura nessa fase, necessários para manter água disponível no solo, quando as plantas atingiram a maior evapotranspiração (261,9 mm) (Tabela 07). Nesta fase, as plantas já atingiram o sombreamento total da superfície do solo permitindo, assim, conforme Weiss (2000) máxima absorção de água.

A drenagem através do perfil do solo totalizou 111,2 mm, aumentando da fase de Estabelecimento para a de Floração, mas diminuindo da fase de Floração para a de Maturação, e, coincidentemente, foi proporcional ao aumento dos volumes de irrigação (Tabela 07). Os baixos valores de drenagem encontrados no presente estudo (0,1 a 2,2 mm d⁻¹) podem ter sido devidos ao manejo de água utilizado baseado na estimativa de consumo da cultura, à uma muito baixa condutividade hidráulica do solo (Tabela 05), fato descrito por Souza et al. (2013) em solos de textura similar, ou às dificuldades encontradas no campo para medir a drenagem do solo, também referidas por Fernandes et al. (1999). Não houve ascensão capilar.

Na variação do armazenamento de água no solo (Δh) constatou-se valores positivos nas fases de Crescimento e de Floração (Tabela 07), indicando que os quantitativos de irrigação, além de suprir a demanda hídrica vegetal, ainda permitiram complementação das reservas do solo. Nas outras fases notou-se valores negativos (Tabela 07) sendo que na fase de Estabelecimento a água aplicada ao solo foi, provavelmente, na sua maior parte, evaporada diretamente da superfície do solo, uma vez que a cobertura vegetal do solo, e consequentemente, a transpiração eram pequenas como também afirmam Reichardt e Timm (2012) enquanto que na fase de Maturação, com a planta em senescência conforme concordam Lima et al. (2006) e Taiz e Zeiger (2009), provavelmente, o consumo e a drenagem, somadas, foram praticamente iguais ao volume de água aplicado por irrigação (Tabela 07) para a variação do armazenamento de água, nessa fase, ser zero.

No presente estudo observou-se, ainda, que a evapotranspiração aumentou ao longo do ciclo do gergelim em função do aumento da área foliar e da transpiração da cultura, de 3,5 mm d⁻¹ na fase de Estabelecimento até 7,7 mm d⁻¹ na fase de Floração, decrescendo a 4,6 mm d⁻¹ na fase de Maturação (Tabela 07). Esses resultados corroboram com Ahmed e Mahmoud (2010) que ao estudarem o balanço hídrico no solo no Sudão, continente africano, observaram valores de ET_c crescentes com a idade da planta, sendo também baixos no início e no fim do ciclo fenológico do gergelim. O decréscimo da ET_c no fim do ciclo ocorreu devido, provavelmente, à senescência natural das folhas reduzindo, assim, a área foliar e conseqüentemente a transpiração, ao reduzir a área das plantas exposta, corroborando com as afirmações de Lima et al. (2006) e de Taiz e Zeiger (2009).

5.3. Estimativas do coeficiente de cultivo (Kc) do gergelim

Da relação entre os valores da ET_c, obtidos pelo balanço hídrico no solo (Tabela 07), e da ET₀, estimados pelo método de Penman-Monteith (Tabela 06), foi obtido, *in situ*, para cada fase fenológica do ciclo do gergelim, o coeficiente de cultivo (Kc) médio, o qual é apresentado na Tabela 08 e representado, juntamente com os valores calculados de ET_c e os estimados de ET₀, durante o período experimental, na Figura 12.

Tabela 08. Valores médios do coeficiente de cultivo (Kc) por fase fenológica do ciclo do gergelim. Barbalha, CE, 2012

Fase Fenológica	Período (DAE)	Duração (Dias)	Kc
I - Estabelecimento (Kc-inicial)	2 a 5	4	0,45
II - Crescimento (Kc-intermediário)	6 a 32	27	0,62
III - Floração (Kc-médio)	33 a 66	34	0,97
IV - Maturação (Kc-final)	67 a 90	24	0,57

O valor de Kc igual a 0,45 obtido para a fase fenológica I (Estabelecimento - Kc-inicial) do presente estudo (Tabela 08, Figura 12), condiz com afirmações do USDA (1993), de Allen et al. (2006), de Reichardt e Timm (2012) e de Bastos et al. (2013), de que o coeficiente de cultivo (Kc) para culturas anuais, como o gergelim, geralmente é baixo na fase de Estabelecimento quando a planta é pequena com um sistema radicular pouco desenvolvido sombreando pequena fração da superfície do solo ocorrendo sobretudo evaporação de água diretamente da superfície do solo (Figura 12), conforme também afirmam Allen et al. (2006).

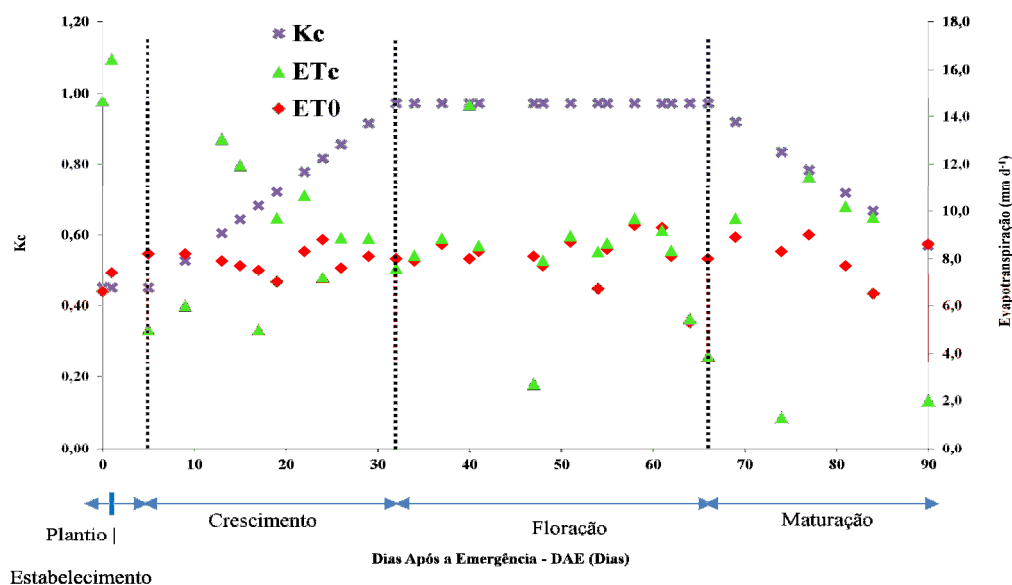


Figura 12. Variação da evapotranspiração de referência (ET0) e da cultura (ETc) do gergelim e do coeficiente de cultivo (Kc), ao longo do ciclo. Barbalha, CE, 2012

O valor do Kc obtido para a fase fenológica II (Crescimento - Kc-intermediário) foi de 0,62 (Tabela 08), igual ao obtido por Amaral e Silva (2008) na mesma região onde foi conduzido o presente trabalho. Observa-se também que os valores de Kc nesta fase aumentaram com o aumento da cobertura vegetal e conseqüente maior área exposta à transpiração à medida que as plantas cresceram (Figura 12), conforme também observaram Allen et al. (2006) e Reichardt e Timm (2012).

O valor de Kc igual a 0,97 da fase III (Floração), aproximou-se do valor 1,10 divulgado pela FAO-56 (ALLEN et al., 2006) para o gergelim, sendo o maior de todas as fases (Kc-médio), conforme também verificaram Uçan et al. (2007), porque o consumo hídrico das plantas (ETc) foi máximo nesta fase (Tabela 07, Figura 12) em virtude das plantas terem atingido o máximo de tamanho e área foliar, concordando com Weiss (2000).

O Kc da Fase IV (final – Maturação) de 0,57 (Tabela 08), foi o menor do ciclo da cultura em função da queda de folhas e redução da área exposta à transpiração a partir da senescência das plantas após o estágio de maturidade fisiológica, quando o consumo hídrico diminuiu (Tabela 07), conforme indicado por Lima et al. (2006) e Taiz e Zeiger (2009). Foi igual ao obtido por Ahmed e Mahmoud (2010) em pesquisa realizada no Sudão, semiárido africano, com cultivares de gergelim de 90 dias de ciclo mas foi maior que o valor apresentado pela FAO-56 (0,25), obtido sob clima temperado com uma cultivar

com 110 dias de ciclo (ALLEN et al., 2006). O maior K_c encontrado, quando comparado com o K_c da FAO (Allen et al., 2006), provavelmente resulta da maior altura média das plantas no presente trabalho (148 cm versus 110 cm). Segundo Bastos et al. (2013), a maior altura e rugosidade de uma cultura podem produzir maiores valores de K_c .

5.4. Análise de crescimento não destrutiva do gergelim nas lâminas de irrigação aplicadas

Os dados da altura da planta (A), da taxa de crescimento relativo da altura (TCRA), do diâmetro caulinar (DC), da taxa de crescimento absoluto do diâmetro caulinar (TCADC) e da taxa de crescimento relativo do diâmetro caulinar (TCRDC) se ajustaram ao modelo não linear de regressão Sigmoidal-logístico. A área foliar (A_f) e ao índice de área foliar (IAF) se ajustaram ao modelo não linear de regressão Peak-log Normal (Figuras 13 a 19).

a) Altura

Na altura da planta (A) constatou-se, para todas as lâminas de água aplicadas, intenso aumento ao longo do ciclo, até aproximadamente os 70 dias após a emergência (DAE) (Figura 13). Os resultados corroboram Allen et al. (2006) e Cairo et al. (2008), que indicam que nesta data provavelmente as plantas da cultura atingiram a maturação fisiológica a qual, normalmente, ocorre no início da fase de maturação.

Observa-se na Figura 13, que nas fases de Crescimento e de Floração, a parte aérea da planta é o dreno preferido e o crescimento é exponencial até atingir um valor máximo no fim da Floração, a partir de quando as plantas praticamente não crescem, corroborando com afirmações de Cairo et al. (2008) e SESACO (2012). Este padrão de crescimento em altura corrobora com os dados de Severino et al. (2002), estudando a fenologia do gergelim BRS 196 CNPA G4, em casa de vegetação, em Campina Grande, PB; de Santos et al. (2010), em experimento em casa de vegetação, Campina Grande, PB, com a cultivar de gergelim BRS 196 CNPA G4; de Lima (2011), com o gergelim BRS Seda cultivado em condições de campo de Campina Grande, PB, com irrigação aplicada manualmente e de Grilo Junior e Azevedo (2013), em experimento irrigado por gotejamento, em Ceará-Mirim, RN, com a cultivar de gergelim BRS Seda.

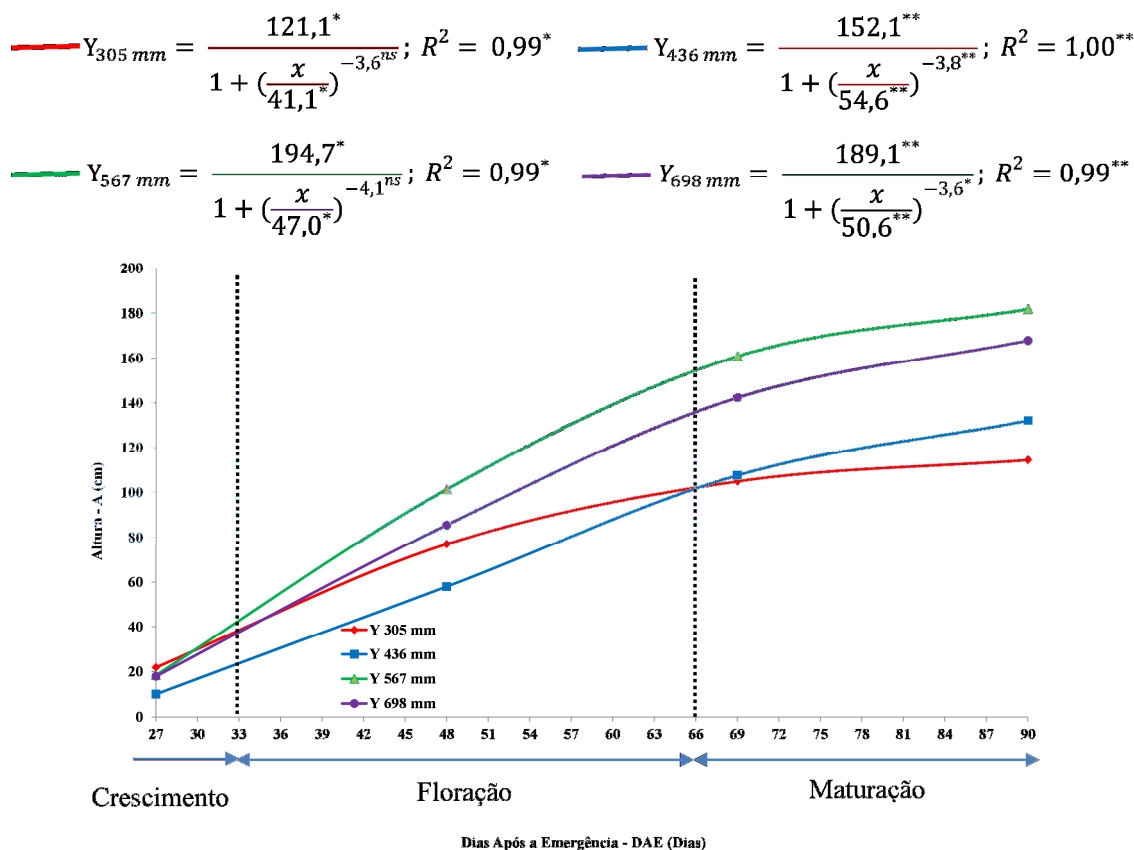


Figura 13. Curvas e equações ajustadas do crescimento em altura (A) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

Na lâmina de irrigação aplicada de 567 mm, correspondente a 100% da ETc, notou-se maiores valores para altura da planta seguida pela lâmina de irrigação de 698 mm (Figura 13). Portanto, a partir deste período o gergelim cresceu mais com maior conteúdo de água no solo, disponibilizando-a suficientemente às plantas da cultura, condições ocorridas nas lâminas de irrigação de 567 mm (Figura 24C - ANEXOS) e de 698 mm (Figura 25D - ANEXOS). Para Mesquita et al. (2013), em experimento irrigado por gotejamento com o gergelim BRS Seda, em Fortaleza, CE, a lâmina de 150% da ETc foi a que maximizou a altura da planta.

Comparando a maior com a menor lâmina de irrigação aplicada encontrou-se, ao final do ciclo, uma diferença de 33% (Figura 13) devido possivelmente, ao déficit hídrico imposto às plantas no tratamento de irrigação com 305 mm (Figura 24A - ANEXOS), pois, segundo Allen et al. (2006), quantidade insuficiente de água prejudica o crescimento das plantas. Já Mesquita et al. (2013), observaram uma diferença menor, na ordem de 20%, trabalhando com gergelim BRS Seda irrigado por gotejamento, em Fortaleza, CE, método

este mais eficiente na distribuição de água no solo que o sistema de irrigação por aspersão. A maior altura foi de 182 cm, obtida com a lâmina de 567 mm (Figura 13). O valor mais alto, obtido por Mesquita et al. (2013) (232 cm), se justifica pela maior eficiência de distribuição de água do sistema de irrigação utilizado.

Em quase todas as lâminas de irrigação aplicadas, a taxa de crescimento relativo da altura (TCRA), decresceu ao longo do ciclo da cultura, ocorrendo o menor decréscimo entre 69 e 90 DAG (fase de Maturação) (Figura 14). Conforme Cairo et al. (2008), a taxa de crescimento decresce em razão do aumento na respiração e do auto-sombreamento quando a planta cresce. O modelo de regressão não linear Sigmoidal-logístico não se ajustou, na lâmina aplicada de 567 mm, aos dados do crescimento relativo da altura do gergelim.

$$Y_{305\text{ mm}} = \frac{0,1^{ns}}{1 + \left(\frac{x}{38,0^{ns}}\right)^{3,8^{ns}}}; R^2 = 0,99^*$$

$$Y_{436\text{ mm}} = \frac{461087,6^{ns}}{1 + \left(\frac{x}{0,1^{ns}}\right)^{2,4^{ns}}}; R^2 = 0,99^*$$

$$Y_{698\text{ mm}} = \frac{0,5^{ns}}{1 + \left(\frac{x}{22,6^{ns}}\right)^{2,7^{ns}}}; R^2 = 0,99^*$$

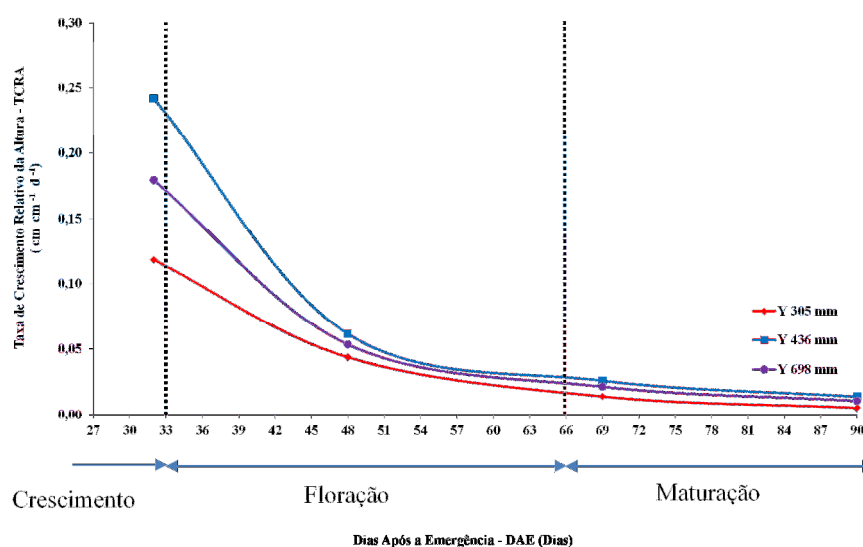


Figura 14. Curvas e equações ajustadas da taxa de crescimento relativo da altura (TCRA) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

Segundo Abdelgadir et al. (2009) e Rashid et al. (2010), a taxa de crescimento do gergelim na fase de Floração normalmente é baixa, tornando-se ainda menor depois desta fase até a maturidade fisiológica quando, conforme SESACO (2012), praticamente cessa.

Visto que no gergelim constatou-se o mesmo padrão de crescimento em altura em quase todas as lâminas de irrigação estudadas pode-se, então, dizer que essas não alteraram o padrão normal de crescimento esperado para o gergelim. Diferenciaram, sim, entre si, nos valores de altura da planta e das taxas de crescimento relativo da altura do gergelim ao longo do ciclo, apresentados nas condições promovidas por cada uma delas (Figuras 13 e 14).

Observa-se também, na lâmina de irrigação aplicada de 698 mm, taxas de crescimento relativo da altura intermediárias às das lâminas de 436 e de 305 mm (Figura 14). Explica-se que o nível suficiente de água no solo, caso das lâminas de 698 mm e de 436 mm (Figuras 24D e 24B – ANEXOS, respectivamente), favoreceu o crescimento vegetativo enquanto que na lâmina de irrigação de 305 mm, condição de estresse hídrico (Figuras 14 e 24A – ANEXOS) as plantas tiveram, provavelmente o crescimento vegetativo reduzido, visto ter direcionado o gasto de energia para sobrevivência, na reprodução (floração), evidenciado pelas menores taxas de crescimento relativo da altura. Conforme afirmações de Taiz e Zeiger (2009), os déficits hídricos, mesmo moderados, levam ao crescimento preferencial das raízes em direção às zonas do solo que permanecem úmidas, depois advindo o fechamento dos estômatos quando os assimilados passam a ser dirigidos para os frutos.

Relativo ainda ao déficit hídrico, Pinto (2006) também verificou, estudando o crescimento inicial do gergelim (até os 50 DAE), em casa de vegetação, em Fortaleza, CE, submetido a ciclos de deficiência hídrica, reduções na altura da planta do gergelim condicionadas provavelmente, pelo fechamento dos estômatos.

Os modelos de regressão não lineares utilizados não se ajustaram aos dados da taxa de crescimento absoluto da altura (TCAA).

b) Diâmetro caulinar

O diâmetro caulinar (DC) aumentou significativamente ao longo do ciclo até aproximadamente os 70 dias após a emergência (DAE) unicamente para a lâmina de água aplicada de 305 mm (Figura 15). Os resultados corroboram com Allen et al. (2006) e Cairo et al. (2008), que indicam que nesta data é provável que as plantas da cultura atingiram a maturação fisiológica. O modelo de regressão não linear Sigmoidal-logístico não se ajustou, nas lâminas de 436, 567 e 698 mm, aos dados do crescimento em diâmetro caulinar do gergelim.

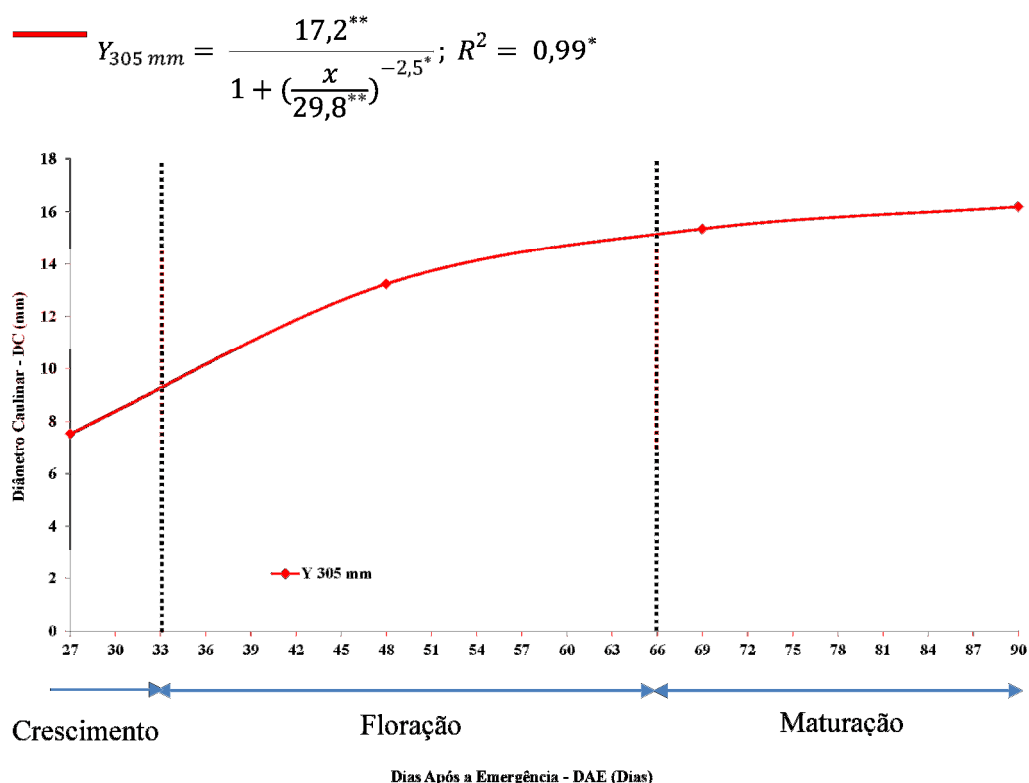


Figura 15. Curvas e equações ajustadas do crescimento em diâmetro caulinar (DC) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

Este padrão de crescimento em diâmetro caulinar observado para a lâmina de 305 mm (Figura 15) corrobora com as observações de Lima (2011), com o gergelim BRS Seda cultivado em condições de campo de Campina Grande, PB, com irrigação aplicada manualmente.

Nas lâminas ajustadas ao modelo de regressão não linear Sigmoidal-logístico as taxas de crescimento absoluto e relativo do diâmetro caulinar (Figuras 16 e 17) decresceram ao longo do ciclo da cultura menos intensamente entre 69 e 90 DAE (fase de Maturação) pois, conforme Cairo et al. (2008), a taxa de crescimento decresce em virtude do aumento na respiração e do auto-sombreamento à medida em que a planta cresce.

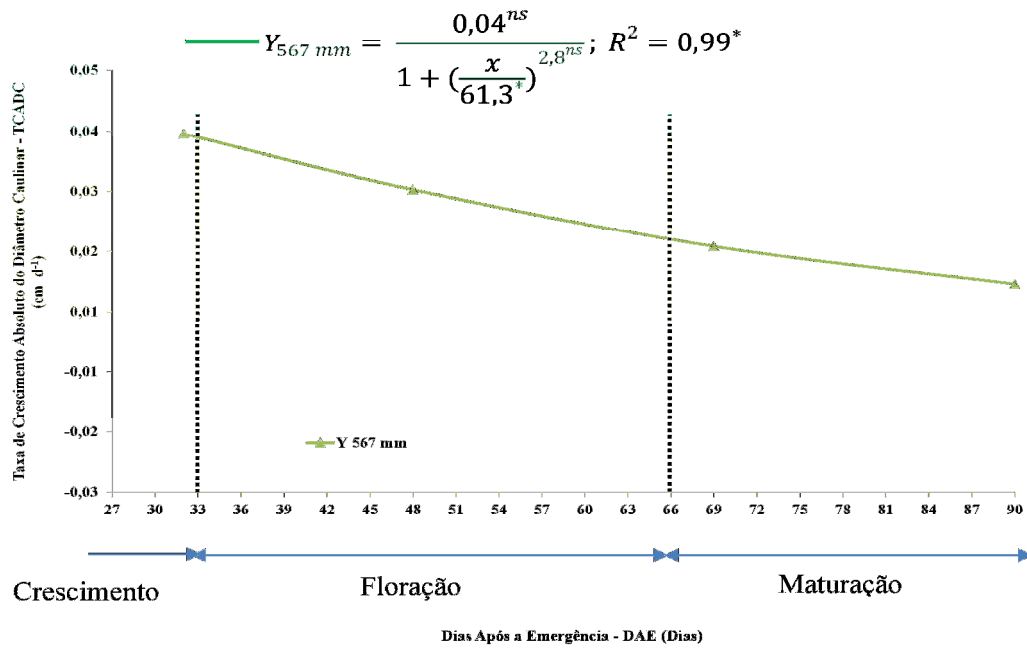


Figura 16. Curvas e equações ajustadas da taxa de crescimento absoluto do diâmetro caulinar (TCADC) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

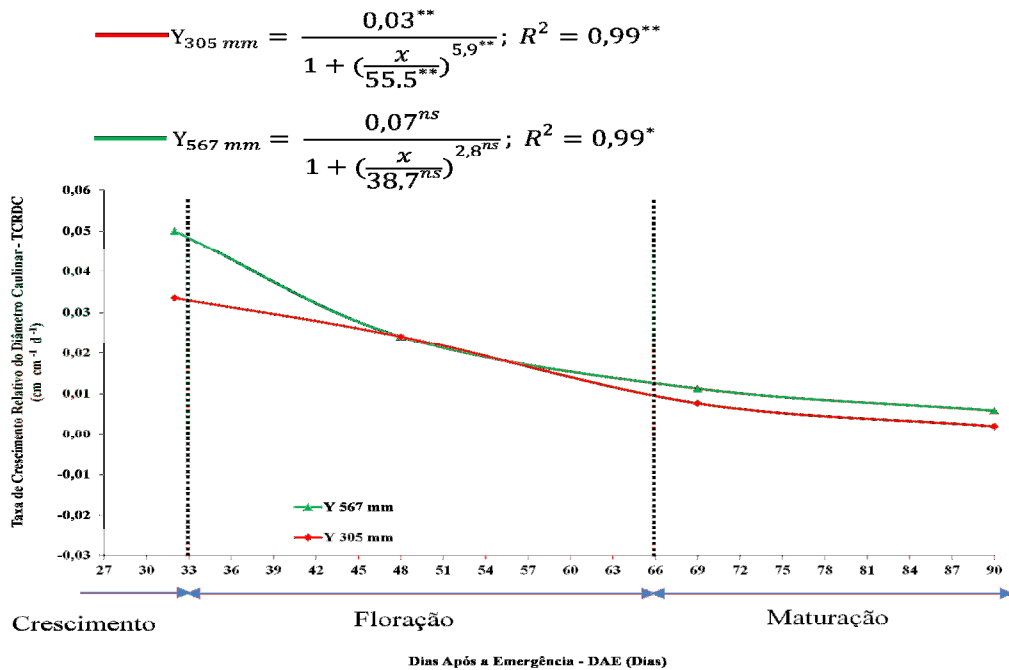


Figura 17. Curvas e equações ajustadas da taxa de crescimento relativo do diâmetro caulinar (TCRDC) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

Os resultados obtidos também estão de acordo com afirmações de Abdelgadir et al. (2009), de Rashid et al. (2010) e de SESACO (2012) sobre o crescimento do gergelim.

Em estresse hídrico (Figuras 24A - ANEXOS), caso da lâmina de 305 mm (Figura 17), as plantas, provavelmente pelo fechamento dos estômatos tiveram o crescimento vegetativo reduzido inicialmente investindo provavelmente, no crescimento de raízes para as camadas mais úmidas e posteriormente, por questão de sobrevivência, na reprodução (floração), apresentando menores taxas de crescimento relativo do diâmetro caulinar, conforme comentado anteriormente.

c) Área foliar

Na área foliar (A_f) e no índice de área foliar (IAF) constatou-se, para todas as lâminas de água aplicadas, intenso aumento nos seus valores, ao longo do ciclo, a partir da fase de Floração até aproximadamente os 70 dias após a emergência (DAE), na lâmina de 305 mm, ou 75 DAE, nas demais lâminas de irrigação aplicadas (Figuras 18 e 19). Os resultados corroboram com os obtidos por Allen et al. (2006) e Cairo et al. (2008) ao indicarem que nessas datas provavelmente as plantas da cultura tiveram atingida a maturação fisiológica. Também para Abdelgadir et al. (2009) e Rashid et al. (2010), a taxa de crescimento em área foliar e no índice de área foliar, do gergelim, que ocorre da fase de Floração até a maturidade fisiológica, é maior, sendo que depois deste período, conforme complementa SESACO (2012), decresce acentuadamente.

Este padrão de crescimento em área foliar observado (Figura 18) é similar ao observado por Severino et al. (2002), com o gergelim BRS 196 CNPA G4, em Campina Grande, PB; por Lima (2011), com o gergelim BRS Seda cultivado em condições de campo de Campina Grande, PB, com irrigação aplicada manualmente e por Grilo Júnior e Azevedo (2013), em experimento irrigado por gotejamento, em Ceará-Mirim, RN, com a cultivar BRS Seda.

A evolução do IAF no presente estudo (Figura 19) seguiu o padrão característico de plantas anuais, preconizado por Allen et al. (2006), que é de uma fase inicial lenta, seguida por uma fase de crescimento rápido até uma fase de acentuado decréscimo após a maturação fisiológica. A fase de Maturação foi, portanto, caracterizada por um IAF máximo e por um decréscimo nos valores de IAF depois do ponto de maturidade fisiológica (Figura 19) devido, provavelmente, segundo Benincasa (2003), à senescência e à consequente queda das folhas.

$$Y_{305\text{ mm}} = \frac{666456,2^{**}}{x} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{72,3^{**}} \right)}{0,2^{**}} \right)^2 \right], R^2 = 0,99^*$$

$$Y_{436\text{ mm}} = \frac{1358357,6^{**}}{x} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{78,3^{**}} \right)}{0,2^{**}} \right)^2 \right], R^2 = 0,99^{**}$$

$$Y_{567\text{ mm}} = \frac{1454389,2^{**}}{x} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{76,9^{**}} \right)}{0,2^{**}} \right)^2 \right], R^2 = 0,99^{**}$$

$$Y_{698\text{ mm}} = \frac{2349400,0^{**}}{x} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{78,3^{**}} \right)}{0,2^{**}} \right)^2 \right], R^2 = 0,99^{**}$$

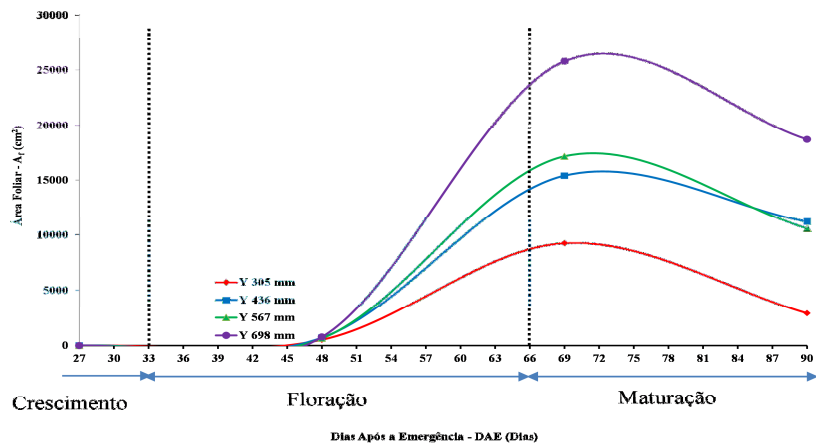


Figura 18. Curvas e equações ajustadas do crescimento em área foliar (A_f) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

$$Y_{305\text{ mm}} = \frac{952,1^{**}}{x} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{72,3^{**}} \right)}{0,2^{**}} \right)^2 \right], R^2 = 0,99^*$$

$$Y_{436\text{ mm}} = \frac{1940,5^{**}}{x} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{78,3^{**}} \right)}{0,2^{**}} \right)^2 \right], R^2 = 0,99^{**}$$

$$Y_{567\text{ mm}} = \frac{2077,7^{**}}{x} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{76,9^{**}} \right)}{0,2^{**}} \right)^2 \right], R^2 = 0,99^{**}$$

$$Y_{698\text{ mm}} = \frac{3356,3^{**}}{x} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{78,3^{**}} \right)}{0,2^{**}} \right)^2 \right], R^2 = 0,99^{**}$$

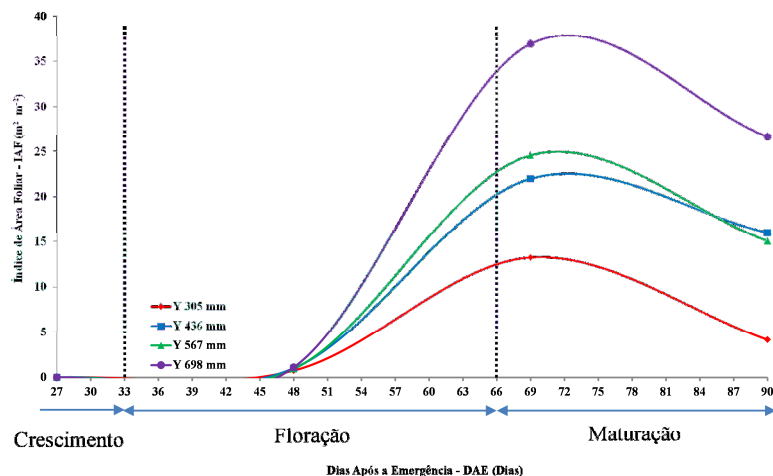


Figura 19. Curvas e equações ajustadas do índice de área foliar (IAF) do gergelim ao longo do ciclo para cada uma das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

A redução observada na área e no índice de área foliar no fim do ciclo da cultura

(Figuras 18 e 19), em todas as lâminas, se deve a vários fatores, principalmente da senescência e abscisão foliar, induzidas pela distribuição preferencial de assimilados para os frutos/cápsulas, como referido por Benincasa (2003). Severino et al. (2002), Albuquerque et al. (2011), Lima (2011) e Grilo Junior e Azevedo (2013) relatam que neste momento as folhas mais velhas e maiores da parte inferior da planta do gergelim começam a cair, assim como identificado no presente trabalho.

Sabendo-se que o padrão de crescimento em área foliar e no índice de área foliar observado no experimento foi o mesmo apresentado em diferentes locais e cultivares, pode-se afirmar que as lâminas de irrigação aplicadas no presente estudo não alteraram o padrão normal de crescimento em área foliar nem no índice de área foliar esperado para o gergelim mas se diferenciaram, sim, entre si, nos valores de área foliar e do índice de área foliar da planta do gergelim ao longo do ciclo, apresentados nas condições promovidas por cada uma delas (Figuras 18 e 19).

Verificou-se, a partir da fase de Floração, aumento significativo na área foliar e no índice de área foliar do gergelim proporcional ao aumento da irrigação, com os maiores valores obtidos nas lâminas de irrigação de 698, 567, 436 e 305 mm, respectivamente (Figuras 18 e 19). Esses resultados são similares aos obtidos por Kassab et al. (2005), no Egito, semiárido africano, comparando diferentes lâminas de irrigação (60, 80 e 100% da ETc) no gergelim Giza 32.

A diferença dos valores de área foliar e do índice de área foliar entre as maiores e a menor lâmina de irrigação aplicada (Figuras 18 e 19) pode ser explicada, segundo Taiz e Zeiger (2009), pela reduzida alongação foliar e subsequente distribuição de menos fotossintatos para tecidos vegetativos na menor lâmina de irrigação. Na lâmina de irrigação de 305 mm, o estresse hídrico (Figura 24A - ANEXOS) reduziu, provavelmente, o crescimento das folhas, promovendo antecipadamente a reprodução e senescência das plantas antes que nos demais tratamentos.

Verificou-se que, com a menor lâmina de irrigação, os decréscimos na área foliar e no índice de área foliar se iniciaram mais cedo, aproximadamente 5 dias antes do que nas outras lâminas de irrigação aplicadas (Figuras 18 e 19). Este fato foi devido, provavelmente, ao déficit hídrico sofrido pelas plantas nessa lâmina de irrigação visto que, segundo Taiz e Zeiger (2009), se as plantas sofrem estresse hídrico após desenvolvimento substancial da área foliar as folhas entrarão, sem dúvida, em senescência e, subsequentemente, cairão. SESACO (2012) também concorda que quantidade inadequada de água produz plantas de gergelim com pouca área foliar e floração antecipada. Pinto

(2006) também verificou, estudando o crescimento inicial do gergelim (até os 50 DAE), em casa de vegetação, em Fortaleza, CE, submetido a ciclos de deficiência hídrica, que nesta condição se reduz mais a alongação foliar do que o número de folhas na planta.

Nenhum dos modelos de regressão não lineares utilizados foram ajustados aos dados das taxas de crescimento absoluto e relativo da área foliar (TCAAF e TCRAF).

5.5. Componentes da produção do gergelim nas lâminas de irrigação aplicadas

Pela análise de variância as lâminas de irrigação aplicadas se diferenciaram entre si quanto ao rendimento (R), ao teor de óleo (O) e a eficiência de uso de água (EUA) do gergelim, não ocorrendo, porém, o mesmo no número de cápsulas (NC) ou de frutos por planta (Tabela 09).

Tabela 09. Resumo da análise de variância do número de cápsulas (NC), rendimento (R), teor de óleo (O) e eficiência de uso de água (EUA) do gergelim em função das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

Fonte de Variação	GL	NC -	R (kg ha ⁻¹)	O (%)	EUA (kg m ⁻³)
Blocos	2	1,20ns	167592,09ns	0,66ns	0,005ns
Lâminas de Irrigação	3	4,41ns	281762,84*	27,72**	0,007*
Linear	1	5,29ns	765733,25**	80,04**	0,012*
Quadrática	1	3,02ns	49758,01ns	1,14ns	0,006ns
Cúbica	1	4,91ns	29797,27ns	1,98ns	0,002ns
Desvios	1	0,00**	0,00**	0,00**	0,000**
Erro	6	2,00	63500,90	0,79	0,001
CV (%)	-	10,36	19,58	1,79	14,74
MÉDIA	-	188,16	1286,82	49,79	0,27

* Significativo (p<0,05), ** significativo (p<0,01), ns não significativo (p>0,05)

Aplicada a regressão polinomial a 1 e 5% de probabilidade, notou-se que os dados observados do rendimento (R), do teor de óleo (O) e da eficiência de uso de água (EUA) do gergelim se ajustaram ao modelo de regressão polinomial linear (Figuras 20, 21 e 222); entretanto os dados do número de cápsulas (NC) ou de frutos por planta não se ajustaram aos modelos de regressão polinomial.

a) Número de Cápsulas (NC) ou de frutos por planta

No presente trabalho não foi possível evidenciar efeito significativo das lâminas de irrigação aplicadas sobre o número de cápsulas (NC) por planta do gergelim (Tabela 09).

Ao contrário, Kassab et al. (2005) no semiárido africano, comparando diferentes sistemas (irrigação superficial controlada e gotejamento subsuperficial e superficial) e lâminas de irrigação (60, 80 e 100% da ETc) na cultivar de gergelim Giza 32 e Mesquita et al. (2013), avaliando cinco lâminas de irrigação (25, 50, 75, 100 e 150% da ET₀) por gotejamento, sobre o gergelim BRS Seda, em Fortaleza, CE, observaram que a irrigação afetou significativamente o número de cápsulas por planta aumentando proporcionalmente com o aumento das lâminas de irrigação aplicadas.

b) Rendimento (R) de sementes

O rendimento (R) de sementes do gergelim aumentou proporcionalmente com a irrigação variando de 1034,59 a 1667,84 kg ha⁻¹ para a menor e a maior lâmina de irrigação aplicada, respectivamente (Figura 20).

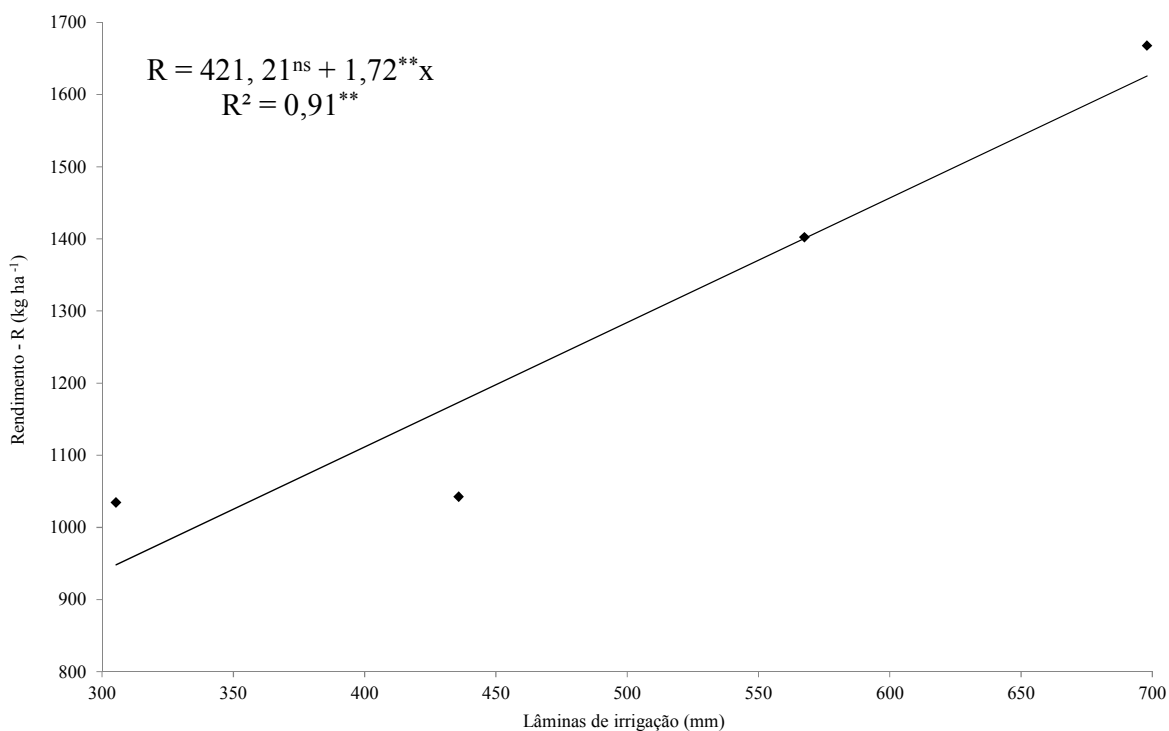


Figura 20. Rendimento de sementes do gergelim em função das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

Os resultados relativos ao aumento do rendimento de sementes do gergelim em função do aumento dos volumes de irrigação aplicados (Figura 20) corroboram com os de Ahmed e Mahmoud (2010), com as cultivares de gergelim Khidir e Promo, por duas safras sucessivas (2001/02 - 2002/03) no Sudão, semiárido africano, e de Silva (2012) na região de Barbalha, CE, estudando lâminas de irrigação com base na ETc.

Ahmed e Mahmoud (2010) obtiveram, em condições climáticas do semiárido africano e com cultivares de ciclo similar à do presente experimento, excelente rendimento de sementes (acima de 3000 kg ha⁻¹) aplicando lâminas de água de 650 e 750 mm.

Silva (2012) encontrou, com a mesma cultivar, mesmo sistema de irrigação e no mesmo local que o presente estudo, mesmo aplicando lâmina de irrigação de 1026 mm, rendimento de sementes similar (1500 kg ha⁻¹) ao do presente trabalho e também não atingiu o potencial varietal de rendimento de sementes de gergelim BRS 196 CNPA G4 que é, segundo Arriel et al. (2009), 2000 kg ha⁻¹.

Conforme observado nas menores lâminas de irrigação aplicadas correspondentes a 305 e 436 mm, as plantas de gergelim foram bastante sensíveis à condição de estresse hídrico (Figuras 20, 24A e 24B - ANEXOS), os quais ocasionando declínio no rendimento corroborando com os dados de Uçan et al. (2007). Esses menores rendimentos obtidos em condições de estresse hídrico observadas na presente pesquisa, foram devidos, provavelmente, ao fechamento dos estômatos pois, segundo Bezerra (2008) e Taiz e Zeiger (2009), este é um mecanismo utilizado pelas plantas para se protegerem das perdas por transpiração mas que acarreta redução na taxa fotossintética e, em contrapartida, no crescimento e no desenvolvimento da planta. Segundo Pinto (2006), o gergelim tem sua assimilação fotossintética reduzida em deficiência hídrica pois, a transpiração é necessária ao crescimento e ao desenvolvimento vegetal já que ao mesmo tempo também ocorre absorção de CO₂, corroborando com as afirmações de SESACO (2012) de que a escassez de água produz plantas de gergelim com poucas cápsulas e baixo rendimento.

Lima et al. (2011) obtiveram, em experimento conduzido sob irrigação por aspersão convencional com base em 100% da ETC, em Barbalha, CE, com a linhagem de gergelim LSGI-5, rendimento de sementes entre 1300 e 2929 kg ha⁻¹ mas com espaçamentos mais estreitos que o utilizado no presente experimento. Grilo Júnior e Azevedo (2013) produziram, com o gergelim BRS Seda, no Rio Grande do Norte, em média, 1600 kg de gergelim ha⁻¹, estando esses valores dentro da faixa potencial de rendimento de sementes de gergelim do presente trabalho.

c) Teor de óleo (O)

O teor de óleo nas sementes do gergelim aumentou proporcionalmente à irrigação, igualando a faixa do potencial varietal que, segundo Arriel et al. (2010) e Bezerra et al. (2010) é de 50% de óleo na semente, a partir da lâmina de irrigação estimada em 452 mm. Os valores de teor de óleo obtidos variaram de 46 a 53% para a menor e a maior lâmina de irrigação aplicada, respectivamente (Figura 21).

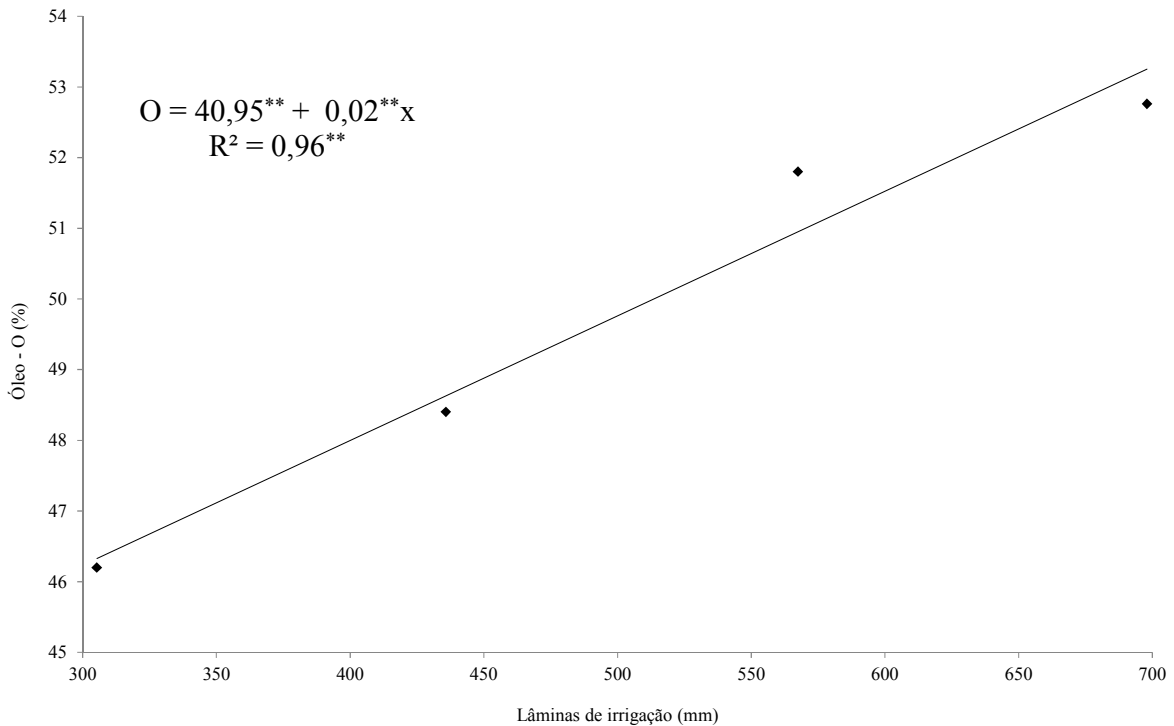


Figura 21. Teor de óleo das sementes do gergelim em função das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

Os resultados corroboram com as afirmações de El-Sayed (2003), Kassab et al. (2005), Were et al. (2006) e Silva (2012) que indicam que o teor de óleo da maior parte das oleaginosas aumenta com a irrigação.

No semiárido africano, Kassab et al. (2005) obtiveram, no Egito, de 56 a 60% de óleo nas sementes do gergelim Giza 32 e Elleuch et al. (2007) em sementes oriundas do Sudão, de 52% de óleo. Observa-se, portanto, que em região do mundo de clima semelhante ao do semiárido brasileiro, o teor de óleo encontrado nas sementes de gergelim ultrapassa 53%, máximo obtido em nossa pesquisa na lâmina de irrigação de 698 mm.

Sob condições brasileiras, segundo Araújo et al. (2006), Bezerra et al. (2010), Silva (2012) e Mesquita et al. (2013), as sementes de gergelim podem conter cerca de 50% de óleo, o que se assemelha ao teor obtido com a presente pesquisa, teor máximo realmente esperado, segundo Arriel et al. (2010), para as condições atuais de cultivo.

De modo geral, observa-se, corroborando afirmações de Taiz e Zeiger (2009), que o gergelim teve o menor rendimento e teor de óleo de sementes nos tratamentos com as menores lâminas de irrigação aplicadas (305 e 436 mm), fato diretamente relacionado às condições de déficit hídrico sofrido pelas plantas.

5.6. Eficiência hídrica do gergelim nas lâminas de irrigação aplicadas

A eficiência no uso da água (EUA) diminuiu com o aumento da lâmina de irrigação obtendo-se a eficiência mais alta ($0,34 \text{ kg m}^{-3}$) com a menor lâmina de irrigação aplicada (305 mm), fato explicado, conforme Taiz e Zeiger (2009), porque a taxa fotossintética da folha é raramente tão responsiva ao estresse hídrico moderado quanto a expansão foliar e, porque o fechamento estomatal inibe mais a transpiração do que diminui as concentrações intercelulares de CO_2 . Para as demais lâminas (436, 567 e 698 mm) obteve-se uma média de aproximadamente $0,24 \text{ kg m}^{-3}$ (Figura 22). Assim, segundo Uçan et al. (2007), ao se obter maior eficiência com água limitada, as plantas de gergelim mostram que usam água eficientemente devido aos seus condicionamentos morfofisiológicos.

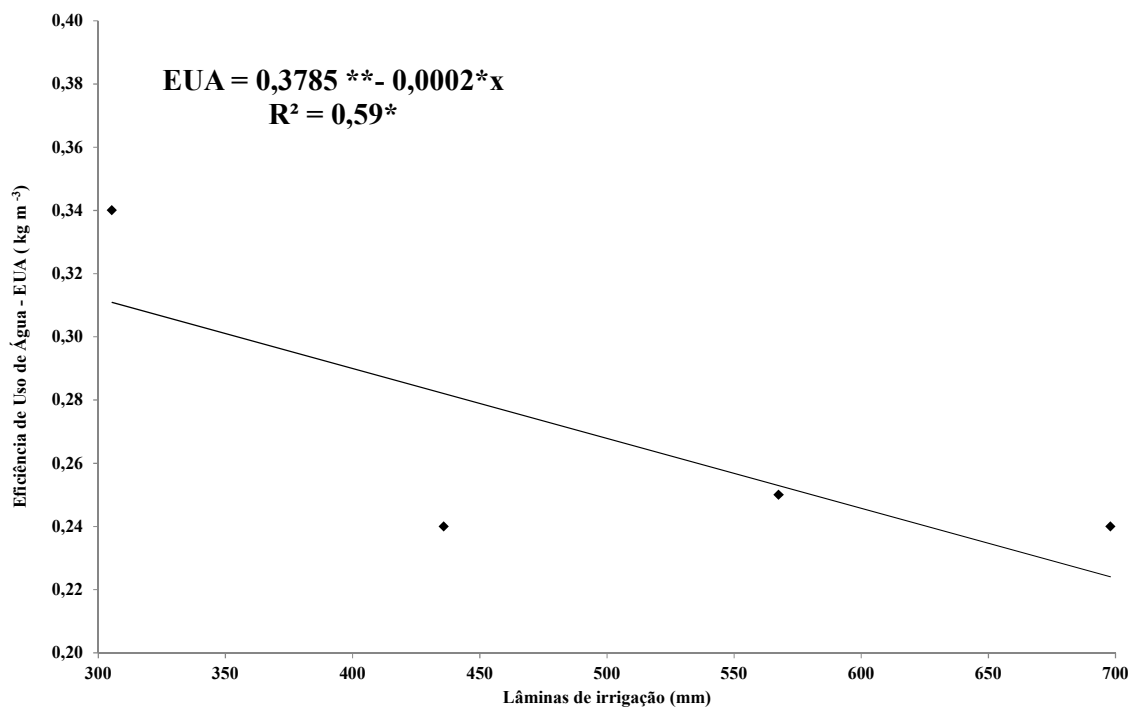


Figura 22. Eficiência de uso de água do gergelim em função das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

Contrariamente, Ahmed e Mahmoud (2010), com as cultivares de gergelim Khidir e Promo, durante duas safras sucessivas (2001/02 - 2002/03) em condições semiáridas do continente africano, Sudão, investigando lâminas de irrigação (750, 650, 550, 450 e 350 mm) com base na evapotranspiração real da cultura (ETr) e Kassab et al. (2005), Egito, também no semiárido africano, comparando diferentes lâminas de irrigação (dentre as quais 60 e 100% da ETC) na cultivar de gergelim Giza 32, observaram que a eficiência de uso de água (EUA) variando de 0,6 a 0,2 e de 0,5 a 0,9 kg m^{-3} respectivamente, aumentou com o aumento do volume de irrigação aplicado.

Comparado aos resultados de EUA obtidos por Ahmed e Mahmoud (2010), muito superiores aos apresentados pela presente pesquisa, não se vislumbra a razão de tão contraditória resposta quando se sabe que o estudo daqueles autores foi feito no Sudão, semiárido africano, local de condições climáticas similares e se utilizando cultivares, espaçamento e época de cultivo, também semelhantes às do presente estudo; já os resultados de Kassab et al. (2005), se justificam por terem sido obtidos por aqueles com irrigação localizada que, segundo Allen et al. (2006), tende a apresentar maiores valores de EUA se comparada à irrigação por aspersão, utilizada no presente estudo.

O valor do fator de resposta ao estresse hídrico (K_y) para o gergelim para todas as lâminas aplicadas foi igual a 0,77 (Figura 23), significando que existiu uma redução de 0,77 unidade no rendimento do gergelim para cada decréscimo unitário na lâmina de irrigação aplicada, confirmando as afirmações de Uçan et al. (2007), que indicam que, durante todo o ciclo, as plantas de gergelim, foram bastante tolerantes a uma provável falta de água no solo. Conforme Steduto et al. (2012), este fator tem mostrado validade e viabilidade notáveis para quantificar os efeitos do estresse hídrico sobre o rendimento das culturas.

Observa-se que o valor de K_y obtido foi menor que 1,00 sinalizando, segundo Steduto et al. (2012), que o gergelim é tolerante ao estresse hídrico concordando também com as afirmações de Bezerra (2008) de que a planta possui resistência estomática bastante elevada, mecanismo que usa para diminuir a evapotranspiração e economizar água para períodos mais críticos no futuro do seu ciclo.

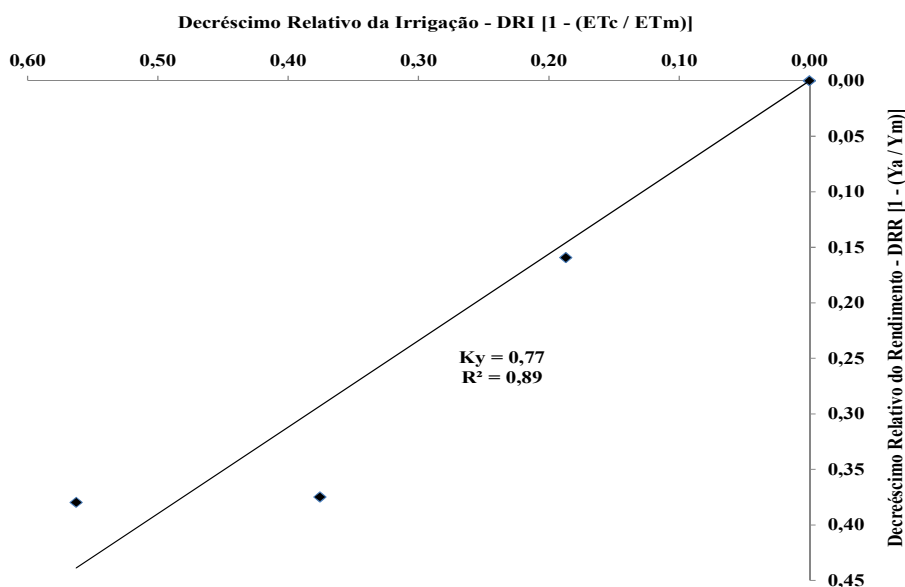


Figura 23. Fator de resposta ao estresse hídrico (K_y) durante o ciclo do gergelim em função das lâminas de irrigação aplicadas. Barbalha, CE, 2012

6. CONCLUSÕES

- 1.- A altura, o diâmetro caulinar, a área foliar e o índice de área foliar do gergelim aumentaram com a irrigação;
- 2.- O gergelim teve maior crescimento em altura, em diâmetro caulinar, em área foliar e em índice de área foliar até os 70 ou 75 dias após a emergência;
- 3.- O maior crescimento do gergelim foi obtido, em geral, no tratamento de irrigação de 698 mm;
- 4.- A lâmina de irrigação de 698 mm foi a que promoveu o maior rendimento e teor de óleo das sementes do gergelim;
- 5.- A lâmina de irrigação de 305 mm foi a que possibilitou a melhor eficiência de uso de água (EUA) de irrigação do gergelim;
- 6.- O coeficiente de cultivo (Kc) médio do gergelim foi de 0,45 para a fase de Estabelecimento, 0,62 para a de Crescimento, 0,97 para a de Floração e 0,57 para a de Maturação;
- 7.- As plantas de gergelim se mostraram tolerantes à falta de água disponível no solo, com fator de resposta ao estresse hídrico (Ky) igual a 0,77.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELGADIR, H. A.; JOHNSON, S. D.; VAN STADEN, J. Effect of foliar application of plant growth regulators on flowering and fruit set in *Jatropha curcas* - a potential oil seed crop for biodiesel. **South African Journal of Botany**, v.75, n.2, p.391-391, 2009.

ABDULLA, R.; CHAN, E. S.; RAVINDRA, P. Biodiesel production from *Jatropha curcas*: a critical review. **Critical Reviews in Biotechnology**, v.31, n.1, p.53-64, 2011.

AGUIAR NETTO, A. de O.; BASTOS, E. A. Reflexões críticas sobre as teorias agronômicas da irrigação. In: AGUIAR NETTO, A. de O.; BASTOS, E. A. (Eds.). **Princípios agronômicos da irrigação**. Brasília: Embrapa, cap.1, 2013. p.17-29.

AHMED, EL N. M.; MAHMOUD, F. A. Effect of irrigation on consumptive use, water use efficiency and crop coefficient of sesame (*Sesamum indicum* L.). **Journal of Agricultural Extension and Rural Development**, v.2, n.4, p.59-63, 2010.

ALBUQUERQUE, F. A. de; BELTRÃO, N. E. de M.; LUCENA, A. M. A. de; OLIVEIRA, M. I. P. de; CARDOSO, G. D. Ecofisiologia do gergelim (*Sesamum indicum* L.). In: BELTRÃO, N. E. de M.; OLIVEIRA, M. I. P. de (Eds.). **Ecofisiologia das culturas de algodão, amendoim, gergelim, mamona, pinhão-manso e sisal**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, cap.4, 2011. p.163-194.

ALBUQUERQUE, P. E. P de; ANDRADE JUNIOR, A. S. de; SOUZA, F. de; SEDIYAMA, G. C.; BEZERRA, J. R. C.; STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Coeficientes de cultivos das principais culturas anuais. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, n.52/53, p.49-57, 2002.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua em los cultivos**. Rome: FAO, 2006. 298p. (Estudio FAO. Riego y Drenaje, 56).

AMARAL, J. A B. do; SILVA, M. T. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do gergelim por manejo de irrigação. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v.12, n.1, p.25-33, 2008.

AMORIM NETO, M. da S.; ARAUJO, A. E. de; BELTRÃO, N. E. de M. Clima e solo. In: BELTRÃO, N. E. de M.; VIEIRA, D. J. (Eds.). **O agronegócio do gergelim no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, cap.5, 2001. p.93-107.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; SILVA, C. R. da; DANIEL, R. Calibração de sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do litoral piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.2, n.4, p.303-307, 2007.

ANDRADE, P. B. **Potenciais polinizadores e requerimentos de polinização do gergelim (*Sesamum indicum*)**. 2009. 75p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

AOAC – ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS. **Official methods of analysis**. 12ed. Washington: AOAC, 1982.

ARAÚJO, A. E.; SOARES, J. J.; BELTRÃO, N. E. de M.; FIRMINO, P. de T. **Cultivo do gergelim**. Campina Grande: Embrapa Algodão, Sistema de produção, 6, versão eletrônica, 2006.

ARAYA, A.; STROOSNIJDERB, L.; GIRMAYC, G.; KEESSTRA, S. D. Crop coefficient, yield response to water stress and water productivity of teff (*Eragrostis tef* Zucc.). **Agricultural Water Management**, v.98, p.775-783, 2011.

ARRIEL, N. H. C.; ANDRADE, F. P. de; VIEIRA, D. J.; FIRMINO, P. T.; BELTRÃO, N. E. de M.; FREIRE, E. C.; BOUTY, F. de A. C.; COUTINHO, J. L. B.; VASCONCELOS, O. L.; PINTO, J. M.; ROCHA, E. M. de M.; AMIM, S. M. F.; OLIVEIRA, J. S. de; AMABILE, R. F.; ASSIS, R. L. de; GUEDES, A. R.; ALENCAR, A. R. de; BIDÔ, L.; COSTA, I. T. da; DANTAS, E. S. B.; PEREIRA, J. R. **Cultivar BRS 196 CNPA G4 e seu sistema de cultivo**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010 (Folder). n. p.

ARRIEL, N. H. C.; BELTRÃO, N. E. de M.; FIRMINO, P. de T. **Gergelim: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 209p.

ARRIEL, N. H. C.; FIRMINO, P. de T.; BELTRÃO, N. E. de M.; SOARES, J. J.; ARAÚJO, A. E.; SILVA, A. C.; FERREIRA, G. B. **A cultura do gergelim**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. 72p. (Cartilha Plantar, 50).

BARCELOS, M. D.; GARCIA, A.; MARCIEL JUNIOR, V. A. Análise de crescimento da cultura da batata submetida ao parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura, em um Latossolo Vermelho-amarelo. **Ciência e Agrotecnologia**, v.31, n.1, p.21-27, 2007.

BASTOS, E. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; PIAUILINO, J. O.; SILVA, E. M. da. Coeficientes de cultura. In: AGUIAR NETTO, A. de O.; BASTOS, E. A. (Eds.). **Princípios agronômicos da irrigação**. Brasília: Embrapa, cap.5, 2013. p.153-178.

BEDIGIAN, D. Evolution of sesame revisited: domestication, diversity and prospects. **Genetic Resources Crop Evolution**, n.50, p.779-787, 2003.

BEDIGIAN, D. History and lore of sesame in Southwest Asia. **Economical Botany**, n.58, p.329-353, 2004.

BELTRÃO, N. E. de M.; SOUZA, J. G. de; PEREIRA, J. R. Fitologia. In: BELTRÃO, N. E. de M.; VIEIRA, D. J. **O agronegócio do gergelim no Brasil**. Campina Grande: Embrapa Algodão; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, cap.3, 2001. p.37-57.

BELTRÃO, N. E. de M.; VALE, L.; SILVA, O. R. F. da. Grãos Oleaginosos. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. da (Eds.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas (Parte 8. Agroenergia)**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, cap.4, 2008. p.753-766.

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. 2.ed. Jaboticabal: Funep, 2003. 41p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8ed. Viçosa: UFV, 2009. 625p.

BEZERRA, S. A. **Crescimento e desenvolvimento do gergelim em estresse hídrico em substrato de biossólido e adubo químico**. 2008, 60p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande.

BEZERRA, S. A.; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, C. A. V. de; SILVA, M. B. R.; SILVA, M. M. da. Produção do gergelim cultivado sob condições de estresse hídrico e diferentes doses de adubação. **Engenharia Ambiental**, v.7, n.3, p.156-165, 2010.

BOYDAK, E.; KARAASLAN, D.; SIMSEK, M.; GERCAK, S.; KIRNAK, H.; KASPA, Y.; OZTURK, I. Effect of irrigation methods and irrigation interval on yield and some yield components of Sesame growing in semi-arid area. **Journal of Agronomy**, v.6, n.3, p.439-443, 2007.

BRITO, A. dos S.; LIBARDI, P. L.; GHIBERTO, P. J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.295-303, 2009.

BRITO, G. G. de; BELTRÃO, N. E. de M. Ecofisiologia vegetal: aspectos bioquímicos e moleculares. In: BELTRÃO, N. E. de M.; OLIVEIRA, M. I. P. de (Eds.). **Ecofisiologia das culturas de algodão, amendoim, gergelim, mamona, pinhão-manso e sisal**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, cap.1, 2011. p.15-64.

CAGRAN, M. I. Selection and morphological characterization of induced determinate mutants in sesame. **Field Crops Research**, n.96, p.19-24, 2006.

CAIRO, P. A. R.; OLIVEIRA, L. E. M.; MESQUITA, A. C. **Análise de crescimento de plantas**. Vitória da Conquista: UESB, 2008.

CARDOSO, G. D.; ALVES, P. L. da C. A.; BELTRÃO, N. E. de M.; BARRETO, A. F. Uso da análise de crescimento não destrutiva como ferramenta para avaliação de cultivares. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.6, n.2, p.79-84, 2006.

CARVALHO, P. G. B.; BORGHETTI, F.; BUCKERIDGE, M. S.; MORHI, L.; FERREIRA FILHO, E. X. Temperature-dependent germination and endomannase activity in sesame seeds. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.13, n.2, p.139-148, 2001.

CAVALCANTI, F. J. de A.; SANTOS, J. C. P. dos; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L. da; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUZA, A. R. de; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B. de; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª. aproximação**. Recife: IPA, 1998. p.155.

CHAKRABORTHY, G. S.; SHARMA, G.; KAUSHIK, K. N. *Sesamum indicum*: a review. **Journal Herbal Medicinal Toxicology**, n.2, p.15-19, 2008.

CHANDRAKAR, B. L.; SEKHAR, N.; TUTEJA, S. S.; TRIPATHI, R. S. Effect of irrigation and nitrogen on growth and yield of summer sesame (*Sesamum indicum*). **Indian Journal of Agronomy**, v.39, n.4, p.701-702, 1994.

CHRISTOFIDIS, D. O futuro da irrigação e a gestão das águas. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, n.80, p.40-47, 2008.

CHUNG, J.; LEE, J.; CHOE, E. Oxidative stability of soybean and sesame oil mixture during frying of flour dough. **Journal Food Science**, n.69, p.574-578, 2004.

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

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, L. S. de. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agrícola**, v.7, n.1, p.57-60, 2005.

CORSO, M. P. **Estudo da extração de óleo de sementes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) empregando os solventes dióxido de carbono supercrítico e n-propano pressurizado**. Toledo: Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Centro de Engenharias e Ciências Exatas, 2008. 106p. Dissertação (mestrado).

DEBAEKE, P.; ABOUDRARE, A. Adaptation of crop management to water-limited environments. **European Journal Agronomy**, v. 21, p.433–446, 2004.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 2000. 306p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Necessidades hídricas das culturas**. Roma: FAO, 1997. 204p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 24).

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agrícola**, v.57, n.1, p.191-192, 2000.

ELLEUCH, M.; BESBES, S.; ROISEUX, O.; BLECKER, C.; ATTIA, H. Quality characteristics of sesame seeds and by-products. **Food Chemistry**, v.103, p.641-650, 2007.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Descrição das principais classes de solos**. Recife: Embrapa Solos, 2005. 15p.

EL-SAYED, M. A. A. Effect of some irrigation treatments on yield, water consumptive and water use efficiency of sesame. **Journal of Agricultural Sciences**, v.28, p. 43-45, 2003.

FARIAS, R. A.; SOARES, A. A.; SEDYAMA, G. C.; RIBEIRO, C. A. A. S. Demanda de irrigação suplementar para a cultura do milho no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.1, p.46-50, 2000.

FERNANDES, E. J.; TURCO, J. E. P.; RODRIGUES, T. de J. D. Balanço hídrico do solo em cultura de soja irrigada. **Engenharia Agrícola**, v.19, n.1, n.p., 1999.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FISCH, S. T. V.; NOGUEIRA JUNIOR, R. J. W.; MANTOVANI, W. Fenologia reprodutiva de *Euterpe edulis* Mart. na mata atlântica (Reserva Ecológica do Trabiju, Pindamanhangaba – SP). **Revista Biociências de Taubaté**, v.6, n.2, p.31-37, 2000.

FONTES, P. C. R.; DIAS, E. N.; SILVA, D. J. H. Dinâmica do crescimento, distribuição de matéria seca na planta e produção de pimentão em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v.23, n.1, p.94-99, 2005.

FRANCO, E. M. **Monitoramento da dinâmica da água e solutos em um perfil de solo, sob sistema de fertirrigação por gotejamento, utilizando sonda de capacitância e extratores de solução**. Piracicaba: ESALQ, 2009. 85p. (Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz).

GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry áreas. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1275-1284, 2009.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento**. João Pessoa: Universitária/UFPB, 1994. 344p.

GOMIDE, R. L.; ALBUQUERQUE, P. E. P. de. Agrometeorologia e otimização do uso da água na irrigação. **Informe Agropecuário**, v.29, n.246, p.72-85, 2008.

GOOGLEMAPS. <<http://maps.google.com.br/maps?hl=pt-br&tab=wl>>. Acesso em: 29/08/2011.

GRICHAR, W. J.; SESTAK, D. C.; BREWER, K. D.; BESLER, B. A.; STICHLER, C. R.; SMITH, D. T. Sesame (*Sesamum indicum* L.) tolerance and weed control with soil-applied herbicides. **Crop Protection**, v.20, n.5, p.389-394, 2001.

GRILO JÚNIOR, J. A. de S.; AZEVEDO, P. V. de. Crescimento, desenvolvimento e produtividade do gergelim BRS Seda na agrovila de Canudos, em Ceará Mirim (RN). **Holos**, v.29, n.2, p.19-33, 2013.

HOWELL, T. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. **Agronomy Journal**, v.93, p.281-289, 2001.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos: Barbalha, CE, 2012**. Acesso em 21 de fevereiro de 2013 pelo site <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.

KARAASLAN, D.; BOYDAK, E.; GERÇEK, S.; SIMSEK, M. Influence of irrigation intervals and row spacing on some yield components of sesame grown in Harran region. **Asian Journal of Plant Sciences**, v.6, n.4, p.623-627, 2007.

KASSAB, O. M.; EL-NOEMANI, A. A.; EL-ZEINY, H. A. Influence of some irrigation systems and water regimes on growth and yield of sesame plants. **Journal of Agronomy**, v.4, n.3, p.220-224, 2005.

KIM, K. S.; PARK, S.H.; JENKS, M. A. Changes in leaf cuticular waxes of sesame (*Sesamum indicum* L.) plants exposed to water deficit. **Journal Plant Physiology**, v.164, p.1134-1143, 2007.

KIRDA, C.; MOUTONNET, P.; HERA, C.; NIELSEN, D. R. (Eds.). **Crop yield response to deficit irrigation**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1999.

KOCA, H.; BOR, M.; OZDEMIR, F.; TURKAN, I. The effect of salt stress on lipid peroxidation, antioxidative enzymes and proline content of sesame cultivars. **Environmental and Experimental Botany**, v.60, n.3, p.344-351, 2007.

LEELA, T; NARESH, B.; REDDY, M. S.; MADHUSUDHAN, N. CH.; CHERKU, P. D. Morphological, physico-chemical and micropropagation studies in *Jatopha curcas* L. and RAPD analysis of the regenerants. **Applied Energy**, v.88, n.6, p.2071-2079, 2011.

LIMA, F. V. de; PEREIRA, J. R.; ARAÚJO, W. P.; ARAÚJO, V. L.; ALMEIDA, E. S. A. B. de; LEITE, A. G. Definição de espaçamentos para o gergelim irrigado. **Revista Educação Agrícola Superior**, v.26, n.1, p.10-16, 2011.

LIMA, J. C. R. de **Crescimento e desenvolvimento do gergelim BRS Seda irrigado com níveis de água residuária e de abastecimento**. 61p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental). Campina Grande: UEPB, 2011.

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

LIMA, V. L. A. de; FARIAS, M. S. S. de; BORGES JUNIOR, J. C. F. Drenagem agrícola no manejo dos solos afetados por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Orgs.) **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, Cap.20, 2010. p.375.

MESQUITA, J. B. R. de; AZEVEDO, B. M. de; CAMPELO, A. R.; FERNANDES, C. N. V.; VIANA, T. V. de A. Crescimento e produtividade da cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.) sob diferentes níveis de irrigação. **Irriga**, v.18, n.2, p.364-375, 2013.

MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. de M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, Série Engenharia Agrícola, 1., 2003, 410p.

MONTEIRO, J. M. G. **Plantio de oleaginosas por agricultores familiares do semiárido nordestino para produção de biodiesel como uma estratégia de mitigação e adaptação às mudanças climáticas**. 2007. 302p. Tese (Doutorado em Ciências e Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, E. C.; CARVALHO, J. A.; REZENDE, F. C.; FREITAS, W. A. Viabilidade técnica e econômica da produção de ervilha (*Pisum sativum* L.) cultivada sob diferentes lâminas de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.2, p.324-33, 2011.

PASCHOLATI, S. F.; WULFF, N. A. Doenças do gergelim. In: KIMATI, H.; AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. **Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas**, 4.ed. São Paulo: Ceres, 2005. p.379-384.

PHAM, T. D.; THI NGUYEN, T-D.; CARLSSON, A. S.; BUI, T. M. Morphological evaluation of sesame (*Sesamum indicum* L.) varieties from different origins. **Australian Journal of Crop Science**, v.4, n.7, p.498-504, 2010.

PINTO, C. de M. **Respostas morfológicas e fisiológicas do amendoim, gergelim e mamona a ciclos de deficiência hídrica**. 2006. 80p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

QUEIROGA, V. P.; SILVA, O. R. R. F. **Tecnologias utilizadas no cultivo do gergelim mecanizado**. Campina Grande: Embrapa Algodão (Documentos, 203), 2008. 140p.

RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R. dos; FORTES, L. T. G (Orgs.) **Normais climatológicas do Brasil: 1961-1990**. Brasília: INMET, 2009. 465p.

RASHID, M.; ANWAR, F.; JAMIL, A.; BHATTI, H. N. *Jatropha curcas* seed oil as a viable source for biodiesel. **Pakistan Journal of Botany**, v.42, n.1, p.575-582, 2010.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas: infiltração de água no solo**. São Paulo: Manole, 1987. p.85.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações – balanço hídrico**. 2.ed. Barueri: Manole, cap.15, 2012. p.317-336.

REIS, G. G.; MULLER, M. W. **Análise de crescimento de plantas - mensuração do crescimento**. Belém: CPATU, 1978. 35p.

SAEIDI, E. A.; TOHIDI-NEJAD, F.; EBRAHIMI, G.; MOHAMMADI-NEJAD; SHIRZADI, M. H. Investigation of water stress on yield and some yield components of sesame genotypes (*Sesamum indicum* L.) in Jiroft region. **Journal of Applied Sciences Research**, v.8, n.1, p.243-246, 2012.

SANTOS, M. S.; BARROS, H. M. M; MARTINS, E. S. C. S.; SAMPAIO, M.; LIMA, V. L. A.; BELTRÃO, N. E. de M.; SAMPAIO, F. M. A. de S. Irrigação com efluente do reator UASB em duas cultivares de gergelim no semiárido paraibano. **Revista Tecnologia e Ciência Agropecuária**, v.4, n.1, p.27-30, 2010.

SENTEK. **Diviner 2000: user guide version 1.21**. Sidney: Sentek Pty Ltd., 2000.

SESACO – SESAME COORDINATORS. **Sesame producer guide**. Austin: SESACO, 2012. 24p.

SEVERINO, L. S.; BELTRÃO, N. E. de M.; CARDOSO, G. D.; FARIAS, V. de A.; LIMA, C. L. D. de. Análise do crescimento e fenologia do gergelim cultivar CNPA G4. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v.6, n.3, p.599-608, 2002.

SIGMA PLOT **For Windows, version 12.0**. Systat Software, 2011.

SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; SOUSA, C. C. M.; PEREIRA FILHO, J. V.; FREITAS, C. A. S. Desempenho de cultivares de girassol sob diferentes lâminas de irrigação no Vale do Curu, CE. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.01, p.57-64, 2011.

SILVA, J. C. A. da. **Crescimento e produção de genótipos de gergelim (*Sesamum indicum* L.) em função de lâminas de irrigação**. Campina Grande: UFCG, 2012. 144p. (Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande).

SILVA, L. C.; BELTRÃO, N. E. de M.; AMORIM NETO, M. da S. **Análise de crescimento de comunidades vegetais**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2000. 18p. (Embrapa Algodão. Circular Técnica, 34).

SILVA, L. C.; SANTOS, J. W. dos; VIEIRA, D. J.; BELTRÃO, N. E. de M.; ALVES, I.; JERÔNIMO, J. F. Um método simples para se estimar área foliar de plantas de gergelim (*Sesamum indicum* L.). **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v.6, n.1, p.491-496, 2002.

SOUZA, C. de; ANDRADE, A. P. de; LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S. de; SILVA, I. de F. da. Balanço hídrico da cultura da mamona sob condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.1, p.3-10, 2013.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water**. Rome: FAO, 2012. 519p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 66).

SUDENE – SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado do Ceará**. Recife: MA/SUDENE, v.1, 1973. 301p. (SUDENE. Boletim Técnico, 28).

SUJA, K. P.; ABRAHAM, J. T.; THAMIZH, S. N.; JAYALEKSHMY, A.; ARUMUGHAN, C. Antioxidant efficacy of sesame cake extract in vegetable oil protection. **Food Chemistry**, n.84, p.393-400, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TEREFE, G.; WAKJIRA, A.; BERHE, M.; TADESSE, H. **Sesame production manual**. Adis-Abeba: Ethiopian Institute of Agricultural Research, 2012. 46p.

UÇAN, K.; KILLI, F. Effects of different irrigation programs on flower and capsule numbers and shedding percentage of sesame. **Agricultural Water Management**, v.98, p.227–233, 2010.

UÇAN, K.; KILLI, F.; GENÇOĞLAN, C.; MERDUN, H. Effect of irrigation frequency and amount on water use efficiency and yield of sesame (*Sesamum indicum* L.) under field conditions. **Field Crops Research**, v.101, p.249-258, 2007.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. SOIL CONSERVATION SERVICE. **National engineering handbook, part 623. irrigation water requirements**. Washington: USDA/SCS, Chap.2, 1993. 302p.

UZUN, B.; ARSLAN, C.; KARHAN, M.; TOKER, C. Fat and fatty acids of white lupin (*Lupinus albus* L.) in comparison to sesame (*Sesamum indicum* L.). **Food Chemistry**, n.102, p.45-49, 2007.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.1, p.898-982, 1980.

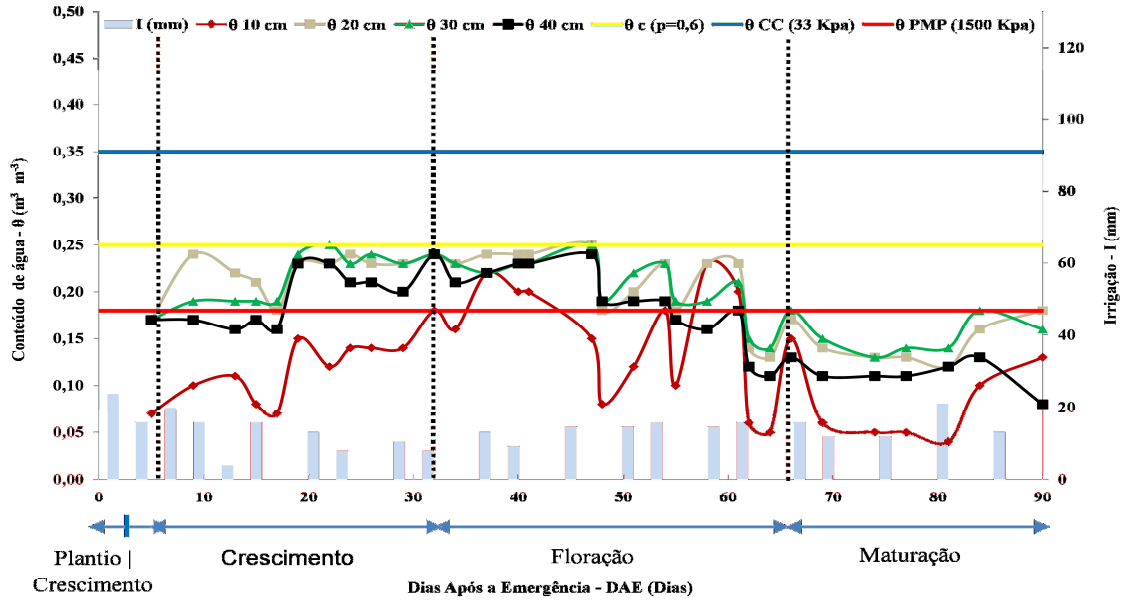
WEISS, E. A. Sesame. In: WEISS, E. A. **Oilseed crops**. London: Blackwell, Chap.5, 2000. p.131-164.

WERE, B. A.; ONKWARE, A. O.; GUDU, S.; WELANDER, M.; CARLSSON, A. S. Seed oil content and fatty acid composition in East African sesame (*Sesamum indicum* L.) accessions evaluated over 3 years. **Field Crops Research**, n.97, p.254–260, 2006.

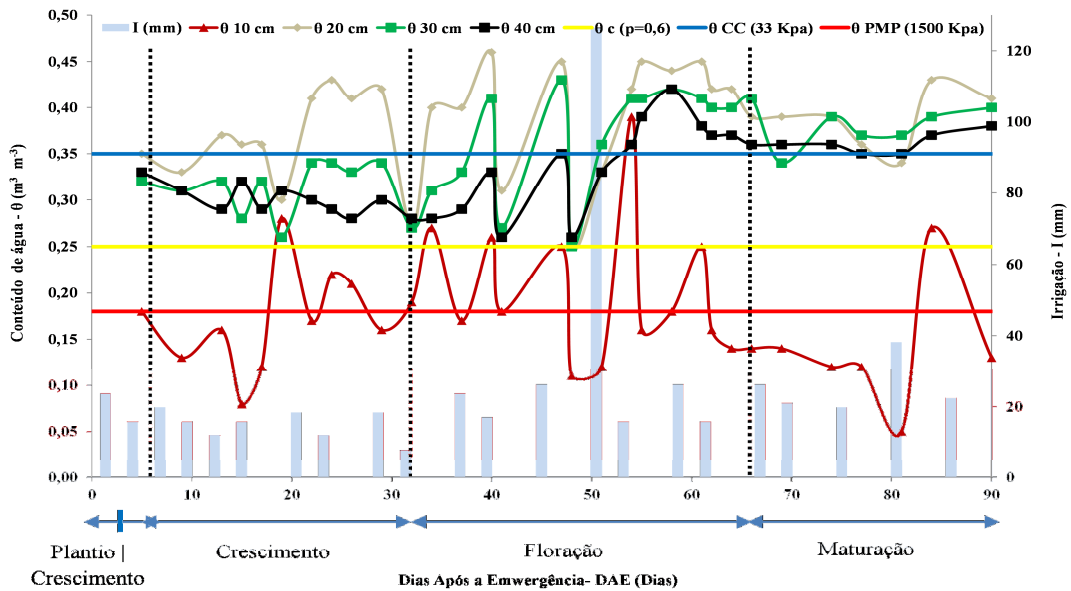
WU, W. H. The contents of lignans in commercial sesame oils of Taiwan and their changes during heating. **Food Chemistry**, n.104, p.34-344, 2007.

8. ANEXOS

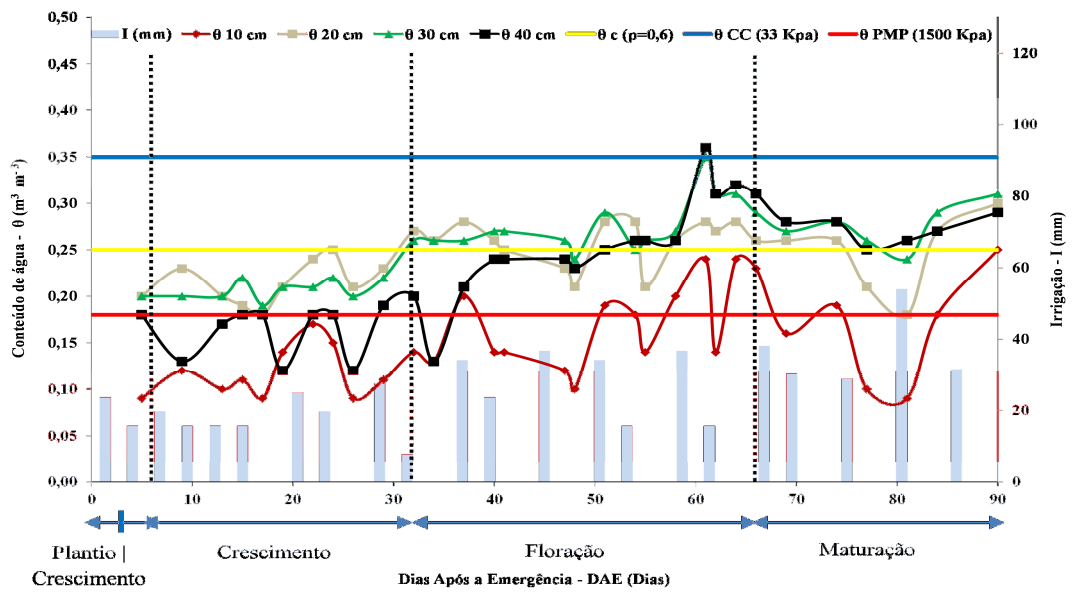
A) $T_1 - 305 \text{ mm}$



B) $T_2 - 436 \text{ mm}$



C) T₃ – 567 mm



D) T₄ – 698 mm

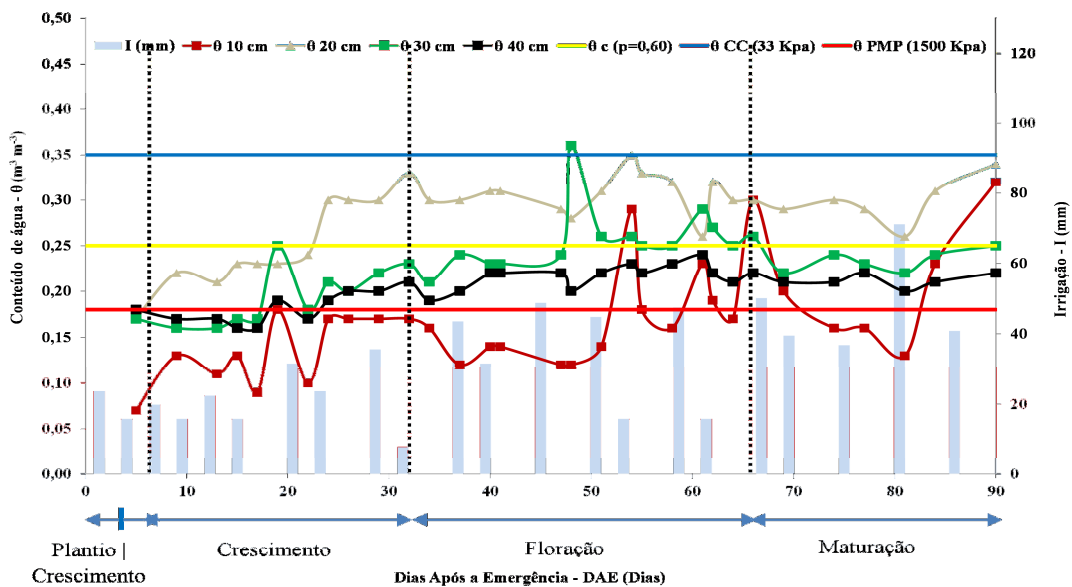


Figura 24. Variação do conteúdo de água do solo nas profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm para cada lâmina de irrigação aplicada durante o período de avaliação do balanço de água no solo (I = Irrigação; θ_z cm = Conteúdo de água na profundidade “z” do solo; θ_c = Conteúdo crítico de água no solo para a cultura do gergelim; CC = Capacidade de campo; PMP = Ponto de murcha permanente). Barbalha, CE, 2012