

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**CARACTERIZAÇÃO DE LINHAGENS DE CÁRTAMO (*Carthamus
tinctorius* L.) EM CONDIÇÕES DE DEFICIÊNCIA HÍDRICA E
REIDRATAÇÃO**

FERNANDA PACHECO DE ALMEIDA PRADO BORTOLHEIRO

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus
de Botucatu, para obtenção do título de Mestre
em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU – SP

Julho – 2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CARACTERIZAÇÃO DE LINHAGENS DE CÁRTAMO (*Carthamus tinctorius* L.) EM CONDIÇÕES DE DEFICIÊNCIA HÍDRICA E REIDRATAÇÃO

FERNANDA PACHECO DE ALMEIDA PRADO BORTOLHEIRO

Orientador: Professor Doutor Marcelo de Almeida Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU – SP

Julho – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

B739c Bortolheiro, Fernanda Pacheco de Almeida Prado, 1990-
Caracterização de linhagens de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) em condições de deficiência hídrica e reidratação / Fernanda Pacheco de Almeida Prado Bortolheiro. - Botucatu : [s.n.], 2015
xi, 68 f. : fots. color., grafs. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2015
Orientador: Marcelo de Almeida Silva
Inclui bibliografia

1. Secas. 2. Plantas oleaginosas - Morfologia. 3. Linhagem (Genética). 4. Desidratação (Hídrica). 5. Plantas oleaginosas - Fisiologia. I. Silva, Marcelo de Almeida. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO DE LINHAGENS DE CÁRTAMO (*Carthamus tinctorius* L.) EM CONDIÇÕES DE DEFICIÊNCIA HÍDRICA E REIDRATAÇÃO

AUTORA: FERNANDA PACHECO DE ALMEIDA PRADO BORTOLHEIRO

ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (AGRICULTURA) , pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA

Dep de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu



Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

Dep de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu



Profa. Dra. CLAUDIANA MOURA DOS SANTOS

Centro de Ciências Agrárias / Universidade Federal de Alagoas

Data da realização: 29 de julho de 2015.

À Deus pela força espiritual, para que eu conseguisse concluir este trabalho.

Aos meus queridos pais, Maria Cecília Pacheco de Almeida Prado e Aguinaldo F. Bortolheiro Jr., que sempre me incentivaram e que são verdadeiros exemplos de garra, honestidade, respeito e paciência para com os desafios da vida.

A minha irmã Carolina Pacheco de Almeida Prado Bortolheiro.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por estar presente em minha vida em todos os momentos me dando força para seguir em frente.

À Faculdade de Ciências Agronômicas, Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal, pela oportunidade de realização do Curso de Mestrado e pela infraestrutura disponibilizada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva, pela orientação, ensinamentos, amizade, paciência, confiança depositada em mim e ajuda na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Maurício Dutra Zanotto, pelas sugestões e pelo material vegetal cedido, que tornou possível a realização deste trabalho.

À Prof. Dr. Maria Márcia Pereira Sartori pela ajuda e paciência nas análises estatísticas.

A CAPES, pelo auxílio financeiro.

À Claudiana Moura dos Santos e Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes pelas sugestões.

Aos amigos e companheiros de trabalho Paula Caroline Silva Moura, Breno Kennedy Lima Bezerra, Lucas Almeida de Holanda, Renata Passos Pincelli, Laís Fernanda Melo Pereira, Marcela Cristina Brunelli, Samara Zanetti e José Gerardo Espinosa Véliz pela ajuda na condução do experimento, companheirismo e momentos de descontração.

Aos estagiários, Ana Carolina Gomes Todesco Brilha (Roceira), Gabriel Henrique Germino, Gabriely Custódio Romero e Fanny Dumet que contribuíram para a execução do experimento e coleta de dados.

Ao meu namorado Murilo Battistuzzi Martins por todo apoio, amor, carinho, paciência, amizade e ajuda, tornando a caminhada mais suave e agradável.

Às amigas e companheiras da República Maracangalha: Isca, Quínuia, Extra, Hipopó, Camará, Roceira, Lignina, Kbuc, Cavarrgada, Fállica, Push, Lelek, Rita, Bola e as novas bixetes Mini, Daputa, Castiga e Hallo. Pelas risadas, amizades e companheirismo.

Aos amigos: Miriam, Samara, Michely, Jéssyca, Marcela, Lais e Fernando, pelas conversas, ajudas, e também pelos momentos de descontração e risadas.

Às amigas: Flávia Gomes, Carolina Criado Stefanin, Natália Zafra Goettlicher, Ana Laura Avelino Evangelista, Ana Carolina Oschiro, pela amizade de longa data.

À minha mãe, Maria Cecília Pacheco de Almeida Prado, ao meu pai, Aguinaldo Francisco Bortolheiro Junior, minha avó Maria Cecília Gonçalves de Oliveira e minha irmã Carolina Pacheco de Almeida Prado Bortolheiro, que sempre estiveram do meu lado me apoiando e dando suporte para as minhas realizações. Obrigada pelo amor e carinho.

À minha família.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho.

A todos meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE FIGURAS	11
1. RESUMO	1
2. SUMMARY	2
3. INTRODUÇÃO.....	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1 A cultura do cártamo.....	6
4.2 Expansão da cultura do cártamo	8
4.3 Cártamo na safrinha	9
4.4 Déficit hídrico	11
4.5 Mecanismos de avaliação da tolerância ao déficit hídrico.....	13
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
5.1 Caracterização da área experimental	16
5.2 Material vegetal	16
5.3 Tratamentos e delineamento experimental	17
5.4 Implantação e condução do experimento.....	17
5.5 Condições ambientais durante o experimento	19
5.6 Avaliações fisiológicas e morfológicas	21
5.6.1 Variáveis fisiológicas	22
5.6.1.1 Potencial de água na folha (Ψ_w)	22
5.6.1.2 Conteúdo de clorofila	22
5.6.1.2.1 Estimativa do conteúdo de clorofila via índice SPAD	22
5.6.1.2.2 Estimativa do conteúdo de clorofila via espectrofotômetro	23

5.6.1.3	Teor relativo de água nas folhas (TRA)	23
5.6.1.4	Tolerância protoplasmática	24
5.6.2	Variáveis morfológicas	25
5.6.2.1	Altura de planta	25
5.6.2.2	Número de capítulos por planta	25
5.6.2.3	Massa de matéria seca	26
5.6.2.4	Produtividade de grãos em kg ha ⁻¹	26
5.6.2.5	Índice de colheita em g g ⁻¹	26
5.6.2.6	Peso de mil grãos	26
5.7	Análise dos resultados	26
5.7.1	Análise estatística fatorial	26
5.7.2	Análise multivariada	27
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
6.1	Componentes de produção	28
6.2	Variáveis fisiológicas	34
6.3	Variáveis morfológicas	43
6.4	Análise dos componentes principais	49
6.5	Similaridade genética	50
7.	CONCLUSÃO	54
8.	REFERÊNCIAS	55

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Análise química básica do solo.....	18
Tabela 2. Análise química dos micronutrientes do solo.....	18
Tabela 3. Análise física do solo.....	18
Tabela 4. Curva de retenção de água do solo.....	19
Tabela 5. Análise de variância dos componentes de produção, número de capítulos por planta, índice de colheita (g g ⁻¹), peso de mil grãos (g) e produtividade (kg ha ⁻¹) em cártamo após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação. Botucatu - SP, 2014.....	28
Tabela 6. Desdobramento da interação entre seis linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para número de capítulos por planta. Botucatu – SP, 2014.....	29
Tabela 7. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para índice de colheita (g g ⁻¹). Botucatu – SP, 2014.....	30
Tabela 8. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para peso de mil grãos (g). Botucatu – SP, 2014.....	32
Tabela 9. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para produtividade (kg ha ⁻¹). Botucatu – SP, 2014.....	33
Tabela 10. Análise de variância do teor relativo de água na folha (TRA), potencial hídrico foliar (Ψ_w), índice SPAD e extravasamento de eletrólitos em cártamo, após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação. Botucatu – SP, 2014.....	34
Tabela 11. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para teor relativo de água na folha (%). Botucatu – SP, 2014.....	35
Tabela 12. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para potencial de água na folha (Ψ_w). Botucatu – SP, 2014.....	36
Tabela 13. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para índice SPAD. Botucatu – SP, 2014.....	37

Tabela 14. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para extravasamento de eletrólitos (%). Botucatu – SP, 2014.....	38
Tabela 15. Análise de variância do teor de clorofila a ($\mu\text{g cm}^{-2}$), clorofila b ($\mu\text{g cm}^{-2}$), clorofilas totais ($\mu\text{g cm}^{-2}$) e carotenoides ($\mu\text{g cm}^{-2}$), em cártamo após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação. Botucatu – SP, 2014.....	39
Tabela 16. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para clorofila a. Botucatu – SP, 2014.....	39
Tabela 17. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para clorofila b. Botucatu – SP, 2014.....	40
Tabela 18. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para clorofilas totais. Botucatu – SP, 2014.....	42
Tabela 19. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para carotenoides. Botucatu – SP, 2014.....	43
Tabela 20. Análise de variância da altura de planta (m), massa de matéria seca de parte aérea (MMS PA), massa de matéria seca de raiz (MMS Raiz), massa de matéria seca de capítulos (MMS Cap) e razão raiz/parte aérea, em cártamo, após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação. Botucatu – SP, 2014.....	44
Tabela 21. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para altura de planta (m). Botucatu – SP, 2014.....	45
Tabela 22. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para massa de matéria seca de parte aérea (g planta ⁻¹). Botucatu – SP, 2014.....	46
Tabela 23. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para massa de matéria seca de raízes (g planta ⁻¹). Botucatu – SP, 2014.....	47
Tabela 24. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para massa de matéria seca de capítulos (g planta ⁻¹). Botucatu – SP, 2014.....	47
Tabela 25. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para razão raiz/parte aérea. Botucatu – SP, 2014.....	49

Tabela 26. Coeficientes de correlação entre os componentes principais (CP1 e CP2) e as características fisiológicas, das linhagens de cártamo (IMA 02, IMA 04, IMA 10, IMA 14, IMA 16 e IMA 21) em três épocas de avaliação: antes da deficiência hídrica, após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação. Botucatu – SP, 2014.....50

Tabela 27. Matriz de similaridade em seis linhagens de cártamo submetidos a tratamento de deficiência hídrica seguido de reidratação (+D) em comparação com o tratamento controle (-D), com base na distância generalizada de Mahalanobis (D^2). Botucatu – SP, 2014.....52

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Temperaturas média, máxima e mínima dentro do cultivo protegido durante o período de 21 de maio a 14 de outubro de 2014. Botucatu – SP, 2014.....	20
Figura 2. Umidade relativa do ar média, máxima e mínima dentro do cultivo protegido durante o período de 21 de maio de 2014 a 14 de outubro de 2014. Botucatu – SP, 2014. 20	
Figura 3. Tensão da água no solo, em vasos, no tratamento sem estresse hídrico (-D) e com estresse hídrico (+D), durante o período de 21 de maio de 2014 a 8 de outubro de 2014. Botucatu – SP, 2014.	21
Figura 4. Medida do índice SPAD em folhas de cártamo.	22
Figura 5. Extração dos discos foliares e recipiente protegido da luz.	23
Figura 6. Recipiente contendo água deionizada e discos foliares para determinação do TRA da folha.	24
Figura 7. Recipientes contendo água deionizada e discos foliares para determinação do extravasamento de membranas.	25
Figura 8. Distribuição das épocas de avaliação, irrigado (antes da imposição da deficiência hídrica), deficiência hídrica (por 30 dias) e reidratação (por 18 dias), de linhagens de cártamo. Botucatu – SP, 2014.	50
Figura 9. Quadro comparativo linhagens de cártamo x regime hídrico adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para as variáveis: número de capítulos por planta (NC), índice de colheita (IC), peso de mil grãos (PMG), produtividade (PROD), teor relativo de água na folha (TRA), potencial de água na folha (Ψ_w), índice SPAD, extravasamento de eletrólitos (EE), clorofila <i>a</i> (Cl <i>a</i>), clorofila <i>b</i> (Cl <i>b</i>), clorofilas <i>totais</i> (Cl <i>t</i>), carotenoides (Carot), altura de planta (AP), massa de matéria seca de parte aérea (MMSPA), massa de matéria seca de raízes (MMSR), massa de matéria seca de capítulos (MMSC) e razão raiz/parte aérea (R/PA). A cor verde representa variável pouco afetada, a cor amarela representa variável moderadamente afetada e a cor vermelha representa variável muito afetada pela deficiência hídrica.....	53

1. RESUMO

Pouco conhecido e explorado no Brasil, o cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) é uma alternativa interessante para ser incluída em sistemas de rotação de cultura na região do cerrado. A cultura é rústica, tolerante à deficiência hídrica e ao frio, tornando-se uma opção para cultivo de safrinha, porém pouco ainda se conhece sobre a variabilidade genética das linhagens introduzidas no país. O objetivo do trabalho foi avaliar a morfologia e a fisiologia de seis linhagens de cártamo em condições de deficiência hídrica seguida de reidratação. O experimento foi realizado sob cultivo protegido em caixas contendo aproximadamente 300 L de solo. Os tratamentos foram arranjos em um delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial 6 x 2. O primeiro fator foi composto por seis linhagens de cártamo (IMA 02, IMA 04, IMA 10, IMA 14, IMA 16 e IMA 21), e o segundo por dois regimes hídricos (sem e com deficiência hídrica). Todas as caixas foram mantidas em capacidade de campo (CC) até os 55 dias após a semeadura (DAS), depois as plantas foram expostas ao estresse por deficiência hídrica por um período de 30 dias. No tratamento sem deficiência (-D) as plantas foram hidratadas em 100% da capacidade de campo (CC), enquanto que no tratamento com deficiência moderada (+D) as plantas foram mantidas com 50% CC. Após o período de 30 dias de deficiência hídrica, as plantas foram reidratadas por 18 dias, neste período foram realizadas avaliações de potencial hídrico foliar, teor de clorofila, conteúdo relativo de água, tolerância protoplasmática, massa seca de raízes, parte aérea e capítulos, razão raiz/parte aérea, altura de planta, número de capítulos por planta, índice de colheita, peso de mil grãos e produtividade de grãos. Há variabilidade genética entre as seis linhagens de cártamo para todas as características avaliadas. As linhagens IMA 21, IMA 10 e IMA 04 tiveram melhor recuperação das características morfofisiológicas após o déficit hídrico e a reidratação, em que a linhagem IMA 14 teve melhores valores de número de capítulos por planta, teor relativo de água na folha, e massa de matéria seca de parte aérea e raiz; e a linhagem IMA 10 se destacou nas variáveis conteúdo de clorofila *a*, *b*, *totais*, carotenoides e índice SPAD. As linhagens IMA 02, IMA 04 e IMA 16 possuem características fisiológicas de maior susceptibilidade à seca. Portanto, constatou-se que as linhagens IMA 10 e IMA 14 têm maior potencial de tolerância ao estresse hídrico. As variáveis índice SPAD, extravasamento de eletrólitos e pigmentos fotossintéticos foram eficientes em avaliar as linhagens de cártamo em condições de estresse hídrico. No período de 18 dias de reidratação nenhuma linhagem teve total recuperação das variáveis morfofisiológicas.

CHARACTERIZATION OF SAFFLOWER LINES (*Carthamus tinctorius* L.) UNDER WATER DEFICIENCY

Botucatu, 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: FERNANDA PACHECO DE ALMEIDA PRADO BORTOLHEIRO

Adviser: Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA

2. SUMMARY

Safflower is barely known and explored in Brazil, but has been shown as an interesting alternative for inclusion in crop rotation systems in the Cerrado region. The culture is rustic, tolerant to cold and water deficiency, what make it an option for cultivation in the off-season. The objective of this work was to evaluate the morphology and physiology of six safflower lines under water deficit. The experiment was carried out in a greenhouse in pots contend approximately 300 L of soil. The treatments were arranged in a randomized block design in factorial scheme 6 x 2. The first factor was composed of six lines of safflower (IMA 02, IMA 04, IMA 10, IMA 14, IMA 16 e IMA 21), and the second was the two water regimes (without and with water deficiency). All the boxes were kept at field capacity (FC) to 55 days after seeding (DAS), after the plants were exposed to water deficiency stress for a period of 30 days. The treatment without deficiency (-D) plants were hydrated in 100 field capacity (FC), while in the treatment with deficiency (+D) plants were maintained with 50% FC. After the period of 30 days, the plants were rehydrated for 18 days, in this period were carried out evaluations of leaf water potential, chlorophyll content, relative water content, protoplasmic tolerance, dry mass of root, shoot and flowers, root/shoot ratio, plant height, number of flowers per plant, harvest index, weight of thousand grains and grain yield. There is genetic variability among the six safflower lines for all traits evaluated. The lines IMA 04, IMA 10 and IMA 21 had better recovery of morpho-physiological characteristics after the water deficit and rehydration, in that, the line IMA 14 had better values of number of chapters per plant, relative water content in leaf, and dry matter of the shoot and root; and the line IMA 10 stood out in the variables contents of chlorophyll *a*, *b*, total, carotenoids and SPAD index. The lines IMA 02, IMA 04 and IMA 16 and had physiological characteristics of susceptibility to drought. Therefore, it was found that IMA 10 and IMA 14 have greatest potential for tolerance to water stress. The variables SPAD index, electrolyte leakage and photosynthetic pigments

were efficient in assessing the lines of safflower under conditions of water stress. In the period of 18 days of rehydration none lines had full recovery of the morpho-physiological characteristics.

Key words: Drought, recovery, oilseed, genetic lines, tolerance, morpho-physiological traits

3 INTRODUÇÃO

O cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) é uma planta oleaginosa anual da família Asteraceae, cultivada em mais de 60 países, é uma cultura que vem ganhando destaque nos últimos anos, principalmente devido ao seu elevado teor de óleo presente nas sementes e a alta qualidade desse óleo. Segundo a FAOESTAT (2013), as Américas do Norte, Central, Sul e Ásia são responsáveis por 97% do óleo de cártamo produzido no mundo, em que os principais países produtores são Estados Unidos da América, México, Argentina e Índia.

As principais informações de cultivo desta espécie indicam ampla adaptabilidade a diversas condições ecofisiológicas, com índices produtivos satisfatórios em condições de baixa disponibilidade hídrica e solos pouco férteis, características que podem tornar a cultura uma boa alternativa para as regiões semiárida e árida brasileiras. O cártamo também pode se adequar as regiões de inverno seco, como ocorre nas áreas agricultáveis da região Sudeste e Centro-Oeste que possuem extensas áreas em pousio no período outono-inverno.

Atualmente, a deficiência hídrica, dentre os estresses ambientais, é um dos grandes problemas que tem afetado grande parte das áreas de cultivo do mundo todo, e vem sendo o principal fator de limitação da produtividade de culturas e provocando

prejuízos na produção de alimentos no mundo todo. As alterações climáticas e a crescente escassez de água têm agravado os efeitos da seca. Assim, estudos que visam à seleção de cultivares mais tolerantes à seca se constituem numa alternativa viável para aumentar a produtividade, além de uma necessidade para o futuro na agricultura sustentável.

Estudos com deficiência hídrica em diferentes estádios de desenvolvimento do cártamo sugerem que a fase vegetativa é a mais sensível a esse fenômeno, reduzindo significativamente o rendimento de grãos da cultura (ISTANBULLUOGLU et al., 2009).

Apesar do alto potencial produtivo e de sua capacidade de adaptação, o cártamo ainda tem baixa expressão econômica no Brasil. Este efeito pode ser resultante da falta de conhecimento sobre a cultura, técnicas de cultivo e informações quanto ao mercado consumidor. Comparado com outras culturas, o cártamo tem o seu potencial genético pouco explorado. Dessa forma, é necessário que haja mais investimentos em pesquisas na cultura, não somente na área de melhoramento, mas também estudos relacionados com a fisiologia e ecofisiologia do cártamo, a fim de se verificar a resposta dessa cultura aos fatores climáticos em diferentes regiões do país.

Diante disso o presente trabalho baseou-se na hipótese de existência de variabilidade genética no cártamo quanto à tolerância ao estresse causado pela deficiência hídrica e sua recuperação, e tem como objetivo caracterizar linhagens de cártamo em condições de deficiência hídrica seguida de reidratação, de modo a avaliar a morfologia e a fisiologia das linhagens de cártamo, avaliar a recuperação das plantas ao estresse através do uso da análise multivariada, determinar variáveis eficientes em distinguir entre linhagens tolerantes e susceptíveis ao estresse, visando identificar características morfológicas e fisiológicas que possam servir como descritores para o referido estresse em programas de melhoramento genético.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A cultura do cártamo

O cártamo é uma das culturas mais antigas do mundo, com relatos de seu cultivo e utilização datados a mais de 4.000 anos. Pode ser chamado também de açafão ou açafão bastardo, dentre outras denominações. A cultura, de origem Asiática e Africana com prováveis centros de distribuição na Índia, Afeganistão e Etiópia, era amplamente utilizada desde a antiguidade como fonte de corante, extraído das flores, usado em alimentos ou tecidos. Nas Américas, foi introduzido no século XX, nos Estados Unidos (ASHRI; DAJUE; MÜNDEL, 1996; KNOWLES, 1960; SILVA, 2013).

O cártamo é um membro da família Asteraceae, e trata-se de uma planta anual, herbácea, de caule ereto e ramificado. Destaca-se entre as oleaginosas, devido ao elevado teor de óleo (32 a 40%) com 70% de ácido linoléico e 30% de ácido oléico, ideais para a produção de biodiesel (VIVAS, 2002).

A cultura é produzida com vários propósitos, desde a produção de folha e flores até, principalmente, a produção de grãos que possuem inúmeras propriedades biológicas e múltiplos usos funcionais (BOWLES et al., 2010). O óleo extraído das

sementes é utilizado clinicamente para tratamento de osteoporose e artrite reumatóide (LEE et al., 2002). Essas propriedades medicinais foram atribuídas a uma grande variedade de substâncias bioativas, tais como ácidos graxos, fenóis, flavonóides, serotonina, ligninas, pigmentos, minerais e óleos voláteis (NOGALA-KALUCKA et al., 2010).

Entretanto, os teores dessas substâncias acima mencionadas podem variar consideravelmente dependendo do genótipo, e das condições ambientais, tais como temperatura, deficiência hídrica, salinidade, entre outras (ASHRAFI; RAZMJOO, 2010). Doudas e Sioulas (2008) ressaltam que a cultura pode ser utilizada na indústria de alimentos, mas vem recebendo maior destaque nos últimos anos especialmente com interesse na produção de bicomcombustíveis.

O ciclo da cultura é relativamente curto, com variações entre 110 a 150 dias, dependendo do genótipo e das condições ambientais. Rocha (2005) constatou que o ciclo de vida do cártamo pode durar 75 dias, quando a espécie é cultivada em temperaturas mais elevadas.

A disseminação desta espécie é realizada por sementes, a germinação pode ocorrer de três a oito dias após a semeadura. Após a emergência, o cártamo tem crescimento lento, dando origem a diversas folhas na base do caule que se desenvolvem próximas ao solo, em disposição circular que caracteriza o primeiro estágio de desenvolvimento, denominado estágio de roseta (SILVA, 2013).

No estágio de roseta, a planta tem pouco ou nenhum desenvolvimento do caule, e grande crescimento de raízes, essa fase pode durar de quatro até oito semanas, dependendo do material genético e das condições ambientais, especialmente a temperatura. O crescimento radicular pode chegar a até 400 cm de profundidade, com numerosas raízes laterais finas. O sistema radicular bem desenvolvido permite à planta explorar maior volume de solo e aumenta a sua capacidade de sobreviver em áreas com pouca umidade na superfície (OELKE et al., 1992; SILVA, 2013).

O caule inicia seu crescimento após o estágio de roseta, e começa a se ramificar quando atinge de 20 a 40 cm (SMITH, 1996). Esse estágio tem duração em torno de seis a oito semanas. O comprimento final do caule varia de 30 a 200 cm. O caule forma as hastes secundárias e estas as hastes terciárias, e cada haste desenvolve uma flor chamada capítulo. As folhas são alternas dentadas ou lobadas, suas brácteas são involucras externas e verdes (ROCHA, 2005).

O início do florescimento se dá em torno de 60 a 100 dias após o semeadura e a maturidade fisiológica ocorre de 4 a 6 semanas após o início da floração (EMONGOR, 2010; SILVA, 2013).

O ponto ideal para colheita se dá entre 2 a 3 semanas após a maturidade. As plantas se encontram completamente senescidas, apresentando coloração marrom das folhas e capítulos. Nesta fase, a umidade das sementes encontra-se com aproximadamente 10% (SILVA, 2013).

Esta cultura é adaptada a diversas condições de clima e solo, exigindo precipitações entre 300 a 600 mm por ciclo vegetativo (EMONGOR, 2010), e considera-se de 20°C a 35°C a faixa de temperatura ideal para o seu bom desempenho (CORONADO, 2010). O cártamo possui elevada tolerância ao déficit hídrico, às temperaturas extremas, aos ventos fortes e à baixa umidade relativa do ar. Exibe grande capacidade de adaptação às mais diferentes condições ecológicas reinantes nas regiões semiáridas, assim tem capacidade de se desenvolver bem em vários tipos de solos, desde que sejam profundos e possuam boa drenagem (BAGHERI; SAM-DAILIRI, 2011; KIZIL et al., 2008).

Apesar de suportar diferentes níveis de umidade no solo, o cártamo não tolera o encharcamento, mesmo que por períodos curtos e clima quente (temperatura do ar superior a 20°C). Mundel et al. (1995) e Rubis (1981) discorreram que isto se deve, em partes a disseminação de patógenos de solo, como a *Phytophthora* spp. e *Pythium* spp., mas principalmente a não adaptação natural da planta a condição anaeróbica, resultando em morte rapidamente.

A produção média de sementes por hectare é em torno de uma a três toneladas, de acordo com a tecnologia empregada, e a população, por hectare, é em torno de 180 a 250 mil plantas. Uma boa produção é observada com precipitações entre 300 a 600 mm anuais (ROCHA, 2005; VIVAS, 2002).

4.2 Expansão da cultura do cártamo

O cultivo do cártamo tem se expandido nos continentes asiático, europeu e americano, devido ao reconhecimento de suas inúmeras utilidades, fonte de óleo de boa qualidade e alto valor para fins industriais e alimentares (SEHGAL; RAINA, 2009).

A área total de sementes de cártamo colhidas no mundo foi de 816.588 ha em 2013, totalizando uma produção de 670 mil toneladas. A Ásia é a maior região produtora do mundo, totalizando 60,4% da produção, com área colhida de 536.994 ha, seguida das Américas com 37,8% e 239.424 ha (FAOSTAT, 2013).

O principal produtor mundial é o Cazaquistão com 175 mil toneladas de grãos, representando 26% da produção mundial, o segundo maior produtor é a Índia, com 16% da produção, seguida dos Estados Unidos da América, México e Argentina (FAOESTAT, 2013).

Em relação à produtividade, a China, lidera seguida pela Turquia, Estados Unidos da América e Canadá com uma produtividade média de aproximadamente 1565, 1536, 1380, 1370 kg ha⁻¹, respectivamente (FAOESTAT, 2013).

No Brasil, o cártamo não tem grande expressão econômica, e ainda é restrito a áreas de pesquisa, isto se deve ao fato da ausência de conhecimento sobre a cultura e de falta de linhagens adaptadas (GEHARD, 2014; SILVA, 2013; ZOZ, 2012).

4.3 Cártamo na safrinha

A segunda safra, também chamada de “safrinha”, é caracterizada pela semeadura entre os meses de janeiro e março, onde a semeadura da cultura pode ocorrer após a primeira safra, visando o aproveitamento das chuvas remanescentes, antes do período da seca, e mais adiante, em sistemas irrigados (ESTEVES et al., 1994). O cultivo durante a safrinha é uma boa alternativa para o agricultor, uma vez que tem como objetivo o aumento da renda, e assim não impõe grandes riscos, pois a formação da renda continua como objetivo da cultura de verão (AMBROSANO, 2012).

É comum a ocorrência de veranicos prolongados durante a safrinha ocasionando perdas na produção, onde essas variam com a intensidade e duração da deficiência hídrica, e dependem do estágio de desenvolvimento da cultura (COUTO et al., 1986). A cultura do milho, amplamente cultivada na safrinha é vulnerável ao déficit hídrico, em qualquer estágio de desenvolvimento, ocasionando prejuízos visíveis a sua produção (BARBOSA, 1986), a utilização de uma cultura tolerante a períodos de seca e com ciclo mais rápido poderia diminuir os riscos de produção no período da safrinha.

A otimização do sistema de produção é necessária, e pode ocorrer por meio da proteção, fertilização e reciclagem de nutrientes do solo através da introdução

de novas espécies (TEIXEIRA et al., 2003). Segundo Chaves e Calegari (2001), a utilização de rotação de culturas no período safrinha com o objetivo de cobertura do solo e ciclagem de nutrientes, visando à diversificação da produção agrícola com sustentabilidade, é uma estratégia para melhorar a qualidade ambiental, pois diminui os efeitos nocivos do meio ambiente.

As culturas de plantas oleaginosas de safrinha são importantes alternativas fitotécnicas para ocupação dessas áreas, que estariam desocupadas, promovendo melhor utilização dos implementos e mão de obra, constituindo-se em alternativa financeira para o agricultor. Ressalta-se que esse processo de sucessão agrícola é fundamental para que haja a quebra do processo de multiplicação de pragas, doenças e plantas daninhas. O Brasil necessita de alternativas que possam ter melhor aproveitamento dessas áreas (AMBROSANO, 2012). É de grande importância o conhecimento das características fitotécnicas das culturas a serem exploradas.

Uma alternativa de grande potencial é o cártamo, que é pouco conhecido na agricultura brasileira, e apresenta importância econômica em outras partes do mundo, principalmente pela sua multiplicidade de usos.

A semeadura e a colheita do cártamo podem ser facilmente realizadas com os mesmos maquinários que são comumente empregados para soja e milho, precisando-se apenas de algumas adaptações, desse modo, o custo de produção se torna bastante acessível (SILVA, 2013).

O cártamo apresenta boa adaptabilidade, tolerância à seca e a altas e baixas temperaturas, alto rendimento de grãos e de óleo. Essas características indicam o potencial para a cultura no sistema de produção do Cerrado. Dos 56,8 milhões de hectares cultivados atualmente no Brasil, 21,9 milhões estão no Centro-Oeste (CONAB, 2014).

Atualmente, o cártamo está despertando grande interesse, pois é uma cultura adaptada para regiões de clima semi-árido, com alta capacidade de se desenvolver e produzir de forma satisfatória sob baixa disponibilidade hídrica. Representa uma alternativa de mercado para os produtores e também para a produção de biocombustíveis (GERHARDT, 2014).

4.4 Déficit hídrico

A agricultura está sujeita a vários tipos de estresses ambientais. Um desses estresses pode ser causado pela disponibilidade hídrica. Uma planta pode ter injúrias tanto por excesso como por falta de água, o estresse por deficiência é mais comum na natureza, esse termo tem sido abreviado para *estresse hídrico* ou *déficit hídrico* (ANGELOCCI, 2002).

O déficit hídrico ou a seca é caracterizado por uma condição meteorológica de períodos prolongados de baixa precipitação. Este é um dos principais fatores ambientais que limita a produção agrícola em todo o mundo, especialmente em áreas áridas e semiáridas (ASHRAF; FOOLAD, 2007; FAROOQ et al., 2009; JONES; CORLETT, 1992).

No Brasil, esta condição é percebida, sobretudo na região Nordeste, onde aproximadamente 54% de toda a área estão situadas no semiárido. A disponibilidade de água no solo é um importante requerimento para determinação da diversidade, crescimento e desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 2003).

O déficit hídrico causa uma mudança significativa das condições ideais de cultivo das plantas, e as impede de expressar todo seu potencial genético de crescimento, desenvolvimento e produção (SHAFIR-UR-REHMAN et al., 2005).

De acordo com Angelocci (2002), a deficiência hídrica é uma medida que está relacionada ao balanço hídrico do vegetal, representado pela diferença entre a absorção e a transpiração, essa diferença revela a direção e o tamanho de um desvio no equilíbrio.

Segundo Larcher (2006), o vegetal está sujeito a uma sucessão de características em resposta as condições de estresse, subdivididas em três fases, fase de alarme, fase de resistência e fase de exaustão. A fase de alarme é caracterizada pela perda da estabilidade das estruturas dos vegetais, e consequente perda de funções vitais como a fotossíntese. Na fase de resistência a planta pode apresentar características de adaptação ou aclimação ao estresse, iniciando um processo de rustificação. E a fase de exaustão é caracterizada pela susceptibilidade do vegetal a pragas ou doenças por consequência da diminuição das defesas.

A característica de tolerância em resposta ao estresse pode se manifestar por dois tipos, aclimação e adaptação. A aclimação ao estresse é relacionada

a exposições anteriores ao estresse e não é uma resposta permanente, enquanto que a adaptação é determinada por alterações genéticas na população e é adquirida por seleção natural (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Para que ocorra a adaptação ou a aclimação aos estresses ambientais são necessárias respostas integradas que ocorrem em todos os níveis de organização: anatômico, morfológico, celular, bioquímico e molecular (PIMENTEL, 2004; BUENO et al., 2006).

A duração, intensidade e frequência do estresse influenciam nas respostas das plantas, assim como as partes afetadas pelo estresse, a fase de desenvolvimento da cultura e o material genético (FRITSCH-NEITO et al., 2011).

Vários mecanismos permitem aos vegetais tolerar a falta d'água em maior ou menor intensidade (SUBBARAO et al., 1995). Kramer e Boyer (1995) relatam que a tolerância ao déficit hídrico é uma característica que apresenta alta variabilidade entre espécies vegetais.

Todos os processos de crescimento do vegetal, desde a raiz até a parte aérea são afetados pelo déficit hídrico, que causa redução do turgor celular, consequente redução na expansão celular, condutância estomática e na acumulação de matéria seca (HSIAO, 1999).

A manutenção de um status hídrico satisfatório em plantas submetidas a condições de déficit hídrico é essencial para a continuação do crescimento dessas plantas. Este processo pode ser alcançado pela regulação estomática (ATHAR; ASHRAF, 2005). Outros mecanismos como, redução da área foliar e a senescência também são extremamente importantes (FARIA, 2013; SANTOS; CARLESSO, 1998).

A primeira resposta das plantas contra a dessecação, na tentativa de manter o conteúdo hídrico nos tecidos é o fechamento estomático. Porém, a redução da abertura dos estômatos reduz a assimilação de CO₂, usado no processo fotossintético, e consequentemente reduz a fotossíntese do vegetal (FARIA, 2013; KRIEG, 1993; LARCHER, 2006).

Numa situação de deficiência hídrica no solo, os vegetais podem, tanto apresentar desordens fisiológicas quanto mecanismos que permitam a sobrevivência sob essas condições. Sendo assim, as respostas das plantas à deficiência hídrica irão variar dependendo da espécie, do genótipo, da duração e severidade do estresse, do estágio fenológico e de qual órgão será mais afetado.

A recuperação após a reidratação é fundamental para a sobrevivência da planta, refletindo o balanço entre a necessidade de reconstrução das estruturas afetadas pela deficiência e a reativação dessas estruturas (MOREIRA et al., 1990). A recuperação depende do genótipo e também do grau de desidratação (KRIEDEMANN; DOWNTON, 1981).

Desde o começo do século XX tem se estudado as respostas das plantas em relação ao estresse por deficiência hídrica, apesar disso, ainda há muito o que se discutir sobre o assunto, tendo em vista a grande variabilidade nas respostas e no grau de tolerância apresentado pelos vegetais (BLUM, 1997).

4.5 Mecanismos de avaliação da tolerância ao déficit hídrico

Segundo Kramer e Boyer (1995), as plantas são os melhores indicadores da disponibilidade hídrica do ambiente. No caso de indicadores da própria planta, a folha é o órgão mais utilizado, pela importância e pela facilidade de se realizarem as medidas dos parâmetros estudados.

O uso de variáveis fisiológicas e morfológicas na identificação de plantas tolerantes à deficiência hídrica e na compreensão deste mecanismo é essencial para o entendimento das alterações no crescimento, seja de ordem genética ou resultante de modificações do ambiente (NEPOMUCENO et al., 2001; PEIXOTO, 1998).

De acordo com Nogueira et al. (2005), o desenvolvimento e crescimento dos tecidos vegetais são em sua maioria afetados pela deficiência hídrica. Conforme a fase fenológica, o déficit hídrico pode ter maior ou menor impacto na produtividade agrícola (PIMENTEL, 2004; RAMESH, 2000).

O crescimento vegetal pode ser acompanhado para quantificar a produção, possibilitando avaliar a contribuição dos diferentes órgãos no crescimento final das plantas. As análises necessárias são massa de matéria seca e área foliar (PEIXOTO; PEIXOTO, 2009).

Segundo Peixoto et al. (2006), a massa de matéria seca foi o parâmetro mais significativo na mensuração das alterações no crescimento vegetal, uma vez que resulta da associação de vários outros componentes.

A variável massa de matéria seca da parte aérea foi a que mais influenciou na diferenciação de linhagens de cana-de-açúcar em condições de deficiência hídrica (GERONIMO, 2014).

O teor relativo de água (TRA) é um dos indicadores do status hídrico do vegetal e corresponde a quantificação da água presente no tecido num dado instante, comparada com a capacidade máxima de retenção deste tecido (CAIRO, 1995).

O controle das funções fisiológicas do vegetal está diretamente relacionado com o conteúdo hídrico da planta e alterações no TRA afetam diretamente todo o aparato fotossintético (GERONIMO, 2014).

Outro importante indicador do status hídrico do vegetal é o potencial de água na folha (Ψ_w), que corresponde ao estado de energia da água nas plantas, o qual é mensurado por uma metodologia descrita por Scholander et al. (1965) e pode ser estimado como a tensão de água no xilema, ou a pressão necessária para que a água possa ser retirada do mesmo (COSCOLIN, 2012).

A deficiência hídrica causa redução dos valores de Ψ_w , tanto pela desidratação do tecido, quanto pela hidrólise dos compostos de reserva (CAIRO, 1995), e consequentemente afeta os processos de fotossíntese, transpiração e condutância estomática.

Muitos estudos têm indicado que quando sujeitas a deficiência hídrica, as folhas de diferentes culturas exibem grande redução do TRA e do Ψ_w (DECOV et al., 2000; EFEUGLU et al., 2009; KYPARISSIS et al., 1995; LI; VAN STADEN, 1998a,b; NAYYAR; GUPTA, 2006; SCARASCIA-MUNGNOZZA et al., 1996). Para que se tenha uma avaliação confiável do status hídrico de um vegetal, tanto o teor relativo de água como potencial hídrico são considerados essenciais e indispensáveis (CAIRO, 1995; PIMENTEL, 2004).

Segundo Pimentel e Perez (2000), o potencial da água na folha é um ótimo indicador do efeito do déficit hídrico no feijoeiro e, aliado à área foliar e à massa da matéria seca da parte aérea, pode discriminar genótipos mais tolerantes à seca.

Além disso, a deficiência hídrica é responsável pela perda de pigmentos nas folhas, ocasionando alterações no ciclo de vida do vegetal. Portanto, a análise do conteúdo de clorofila é importante para indicar a integridade do aparato fotossintético e fornece uma técnica precisa e rápida em detectar plantas mais tolerantes à deficiência hídrica (GUIMARÃES, 2011).

No trabalho de Efeoglu et al. (2009), o conteúdo de clorofila (*a*, *b*, *totais*) de três linhagens de milho em condição de déficit hídrico reduziu significativamente sob estresse, porém aumentou e alcançou os valores do controle durante a reidratação, concluindo que o decréscimo do conteúdo de clorofila indica que a deficiência hídrica induz uma grande perda dos centro de reação da fotossíntese.

Os carotenoides são pigmentos protetores contra o excesso de energia que é acumulada em condições de estresse (EFEOLGU et al., 2009; FARRANT, 1998; GOULD et al., 2002; SHERWIN; PIETRINI et al., 2002; YOUNG, 1991), ou seja, os carotenoides servem como antioxidantes não enzimáticos (JUNG et al., 2000). Altos conteúdos de carotenoides têm sido sugeridos como um mecanismo que aumentam a tolerância ao estresse (CHANDRASEKAR et al., 2000).

As membranas celulares também são afetadas pela deficiência hídrica. Segundo Bajji et al. (2001) as injúrias as membranas celulares podem ser um dos primeiros indícios de estresse.

A membrana tem grande importância na manutenção da viabilidade da célula, promovendo equilíbrio osmótico e iônico entre a célula, seus componentes e o ambiente em que a planta está inserida (BAJJI et al., 2001), portanto, segundo o autor a manutenção da integridade e estabilidade das membranas é um mecanismo de tolerância ao estresse.

Não existe uma única variável fisiológica que, por si só, seja indicativa de tolerância à seca. Segundo Nogueira et al. (2001), o ideal é que mais de uma variável seja avaliada.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi implantado e conduzido em ambiente protegido, localizado no Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal da Faculdade de Ciências Agrônômicas - FCA/UNESP, em Botucatu-SP (22°51'01" latitude Sul e 48°25'55" longitude Oeste e altitude 800,1 m), no período compreendido entre os meses de maio a outubro de 2014, totalizando 161 dias. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Cwa, clima temperado quente (mesotérmico), com chuvas de verão e seca no inverno, e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C.

5.2 Material vegetal

Foram avaliadas seis linhagens de cártamo, IMA 02, IMA 04, IMA 10, IMA 14, IMA 16 e IMA 21.

As linhagens eram provenientes do banco de germoplasma Norte Americano *Western Regional Plant Introduction Station* (WRPIS), obtidos por meio do *Germplasm Resources Information Network* (GRIN), dos quais foram importadas pelo

Instituto Matogrossense do Algodão (IMA-MT) e posteriormente cedidas ao Programa de Melhoramento de Cártamo da Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu.

5.3 Tratamentos e delineamento experimental

Foi adotado o delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições em esquema fatorial 6 x 2. O primeiro fator era composto por seis linhagens de cártamo e o segundo fator foi constituído por dois regimes hídricos (sem deficiência = -D, e com deficiência = +D, $\Psi_{os} = -0,22$ MPa). Cada caixa continha duas fileiras com oito plantas de cártamo em cada fileira. Cada unidade experimental foi constituída por caixas de 0,57 m de altura, 1,0 m de comprimento e 0,8 m de largura, com drenagem, com capacidade de 500 L, com superfície de aproximadamente 0,8 m², contendo aproximadamente 300 L de solo classificado como neossolo de textura média (EMBRAPA, 2006), retirado de ambiente de produção agrícola.

5.4 Implantação e condução do experimento

Para a obtenção das plântulas, foram selecionadas sementes de tamanho e peso homogêneo. Em seguida, foi feito um teste de germinação com as sementes selecionadas, para determinação da densidade de semeadura. Posteriormente, as sementes de cártamo foram semeadas nas caixas nas seguintes densidades 30, 58, 60, 70, 90 e 35 sementes por metro, respectivamente, das linhagens IMA 02, IMA 04, IMA 10, IMA 14, IMA 16 e IMA 21.

A semeadura e a adubação foram realizadas de forma manual no dia 5 de maio de 2014, em espaçamento 0,5 m entre as linhas e 0,10 m entre as plantas, o fertilizante foi posicionado 0,05 m abaixo das sementes, e as sementes em profundidade de 0,03 m. A adubação foi realizada de acordo com a análise de solo (Tabelas 1, 2 e 3) e a recomendação de adubação seguiu instruções do Boletim 100 para a cultura do girassol (QUAGGIO; UNGARO, 1997) devido ao fato de serem da mesma família e de não existirem recomendações para a cultura do cártamo. Dessa maneira, foram aplicados 420 kg ha⁻¹ da fórmula 4-30-16 (NPK), os dados foram extrapolados pela área das caixas.

Aos 30 dias após a semeadura foi realizado o desbaste, deixando oito plantas por linha. A adubação de cobertura foi realizada no dia 16 de junho de 2014, aos 41 dias após a semeadura, somente com nitrogênio, na forma de ureia na dose de 40 kg ha⁻¹.

O monitoramento de umidade nas caixas foi realizado com o auxílio de tensiômetros, instalados em todas as caixas a 20 cm de profundidade e a tensão foi medida com um tensímetro (modelo digital, marca Sondaterra, Piracicaba, SP, Brasil). A reposição da água foi feita diariamente baseada na leitura das tensões de água no solo e definida de acordo com a curva de retenção de água do solo (Tabela 4).

Todas as caixas foram mantidas em capacidade de campo (CC) até os 55 dias após o semeadura (DAS), correspondente a fase vegetativa de alongamento e ramificação do caule, depois as plantas foram expostas ao estresse por deficiência hídrica moderado por um período de 30 dias. No tratamento sem deficiência (-D) as plantas foram hidratadas com a quantidade necessária para manter o teor de umidade ideal no solo, em torno de 22% (que corresponde a 100% da capacidade de campo), enquanto que no tratamento com deficiência (+D) as plantas foram mantidas com 50% do teor dessa umidade, caracterizado como estresse moderado.

Tabela 1. Análise química básica do solo.

pH	M.O.	P_{resina}	Al³⁺	H + Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	S
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmolc dm ⁻³ -----								mg dm ⁻³
5,6	9	34	--	18	1,4	78	29	108	126	86	--

Tabela 2. Análise química dos micronutrientes do solo.

Boro	Cobre	Ferro	Manganês	Zinco
----- mg dm ⁻³ -----				
0,25	4,2	41	16,3	0,6

Tabela 3. Análise física do solo.

Areia			Argila	Silte	Umidade	Textura
Grossa	Fina	Total				
----- g kg ⁻¹ -----					(%)	
--	--	773	150	77	--	Média

Após o período de 30 dias de deficiência, as plantas foram reidratadas por 18 dias, restabelecendo o fornecimento da quantidade ideal de água para o seu bom desenvolvimento.

Valores de temperatura e umidade relativa do ar máxima e mínima foram coletados diariamente utilizando-se de um aparelho portátil termohigrômetro HT-500 (marca Instrutherm, modelo HT-500, São Paulo, SP, Brasil) que foi instalado no experimento.

Tabela 4. Curva de retenção de água do solo.

Tensão (MPa)	Saturado	0,003	0,004	0,0006	0,01
Água retida ($\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$)	0,33	0,25	0,23	0,21	0,17

5.5 Condições ambientais durante o experimento

Segundo Coronado (2010), a faixa de temperatura ideal para o bom desenvolvimento do cártamo é entre 20°C a 35°C. A cultura pode tolerar temperaturas entre -7°C a até 46°C, porém seu desenvolvimento é comprometido.

Durante o experimento foi observada a variação da temperatura e umidade relativa do ar por todo o ciclo da cultura. A temperatura máxima média do ar foi de 35,9 °C $\pm$ 6,9, a temperatura mínima média do ar de 14,8 °C $\pm$ 2,8 (Figura 5), a umidade relativa máxima média do ar foi de 81,7% $\pm$ 9,6 e a umidade relativa mínima média do ar foi de 33,9% $\pm$ 13,6 (Figura 6).

Em 48% dos dias as temperaturas diurnas foram maiores que 35°C, e em 47% dos dias a temperatura noturna foi menor que 15°C (Figura 5).

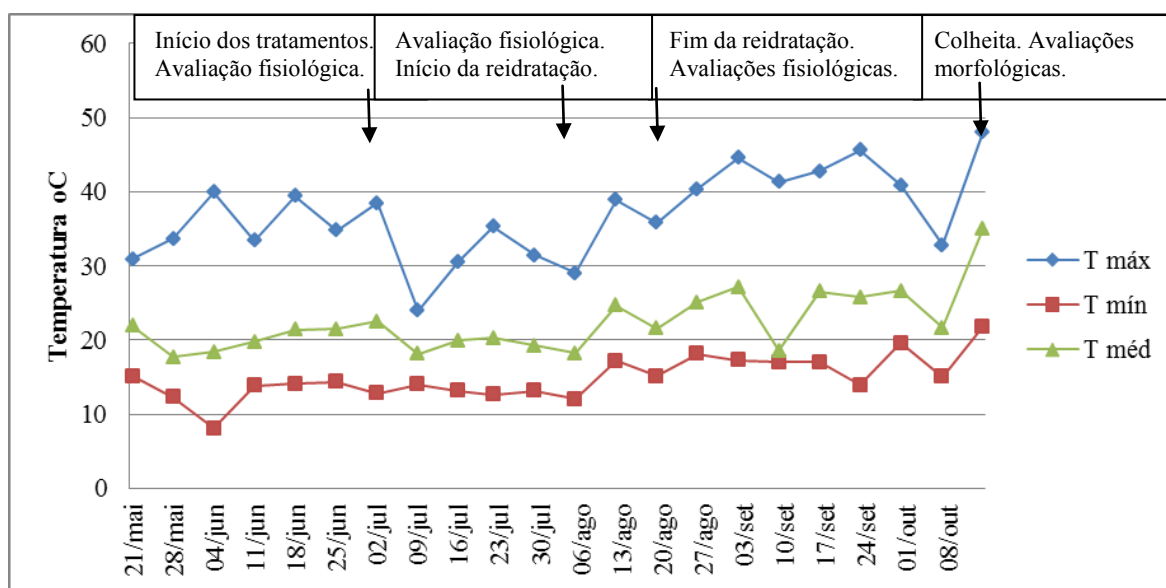


Figura 1. Temperaturas média, máxima e mínima dentro do cultivo protegido durante o período de 21 de maio a 14 de outubro de 2014. Botucatu – SP, 2014.

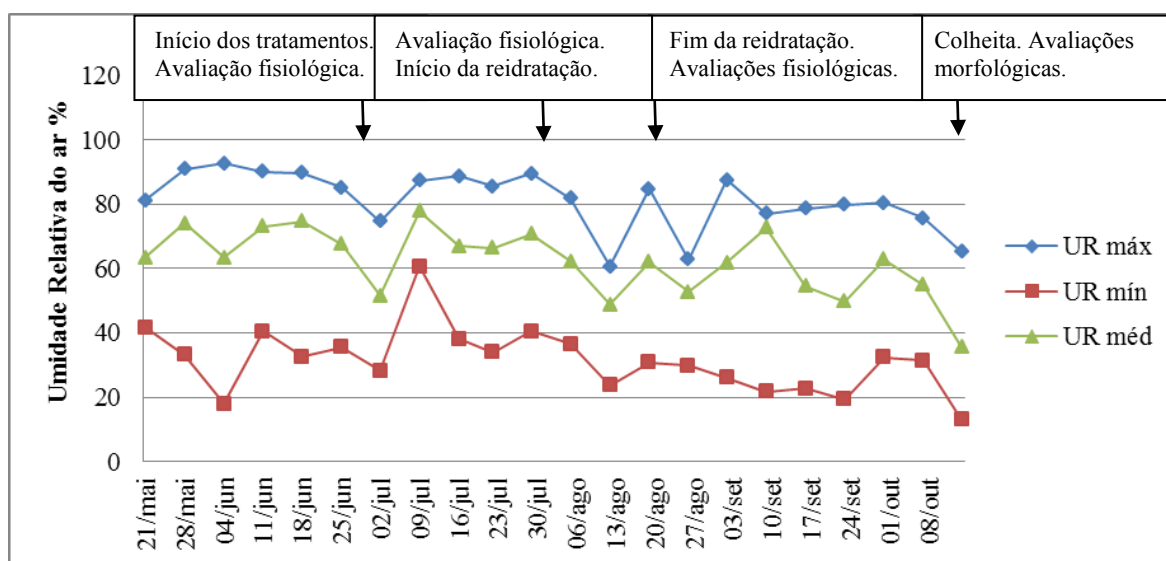


Figura 2. Umidade relativa do ar média, máxima e mínima dentro do cultivo protegido durante o período de 21 de maio de 2014 a 14 de outubro de 2014. Botucatu – SP, 2014.

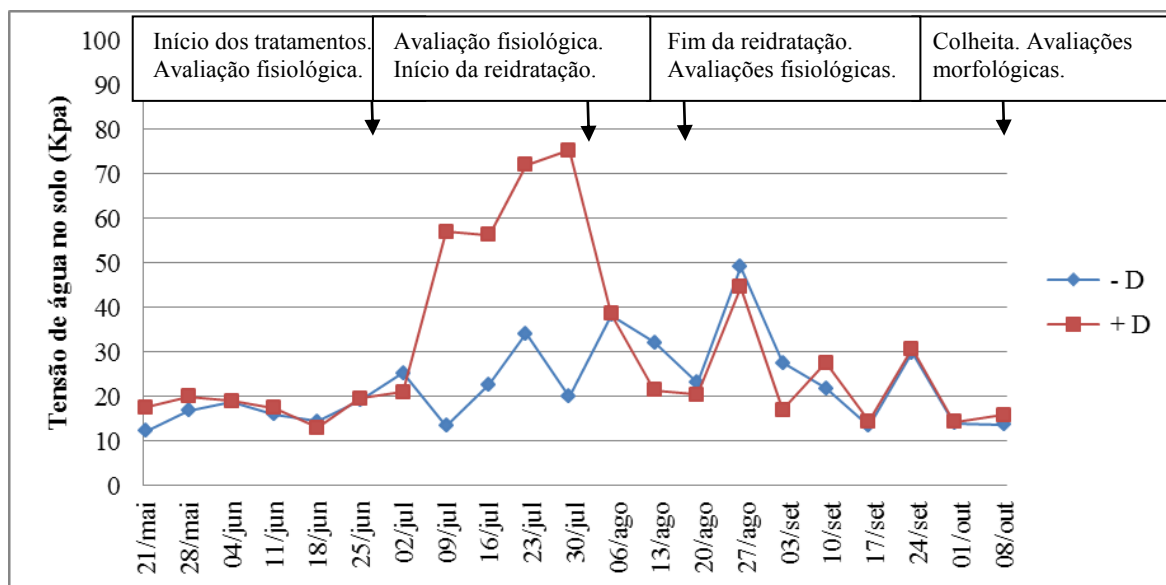


Figura 3. Tensão da água no solo, em vasos, no tratamento sem estresse hídrico (-D) e com estresse hídrico (+D), durante o período de 21 de maio de 2014 a 8 de outubro de 2014. Botucatu – SP, 2014.

Os tratamentos foram diferenciados no dia primeiro de julho de 2014, até quando a tensão de água no solo se manteve praticamente igual em todas caixas (Figura 7). A partir desta data, com a implementação dos tratamentos de regime hídrico, houve clara diferenciação da tensão de água no solo entre os tratamentos até 01 de agosto de 2014. Com a reidratação do solo no tratamento de déficit hídrico, a partir de 18 de agosto as tensões de água no solo voltaram se igualar até a data das avaliações fisiológicas.

5.6 Avaliações fisiológicas e morfológicas

As avaliações fisiológicas foram realizadas em três épocas: a primeira antes do início dos tratamentos (55 DAS), a segunda 30 dias após a exposição das plantas a deficiência hídrica (85 DAS) e a terceira 18 dias após o fim da indução da deficiência hídrica (recuperação das plantas) (103 DAS).

5.6.1 Variáveis fisiológicas

5.6.1.1 Potencial de água na folha (Ψ_w)

Foram coletadas folhas do terço superior das plantas e as leituras foram feitas na extremidade (ponta) dessas folhas, onde foi aplicada pressão até ocorrer a exsudação pelo corte feito no pecíolo da folha, utilizando-se a câmara de pressão Scholander (Soil Moisture Equipment, Santa Bárbara, CA, EUA). O potencial de água foi avaliado entre às 08:00 e 11:00 horas.

5.6.1.2 Conteúdo de clorofila

5.6.1.2.1 Estimativa do conteúdo de clorofila via índice SPAD

A estimativa do conteúdo de clorofila foi determinado usando um clorofilômetro SPAD-502 (Minolta Corp., Ramsey, NJ, EUA). Foi utilizada a média de três leituras efetuadas nas folhas do terço superior da planta (Figura 1).



Figura 4. Medida do índice SPAD em folhas de cártamo.

Após as leituras com o aparelho, a mesma folha foi imediatamente acondicionada e transportada para o laboratório em uma caixa térmica com gelo para minimizar perda do teor de umidade e degradação da clorofila e foram feitas medidas do conteúdo de clorofila total e teor relativo de água.

5.6.1.2.2 Estimativa do conteúdo de clorofila via espectrofotômetro

As determinações dos teores de clorofila em laboratório foram realizadas com as mesmas folhas utilizadas na leitura com o sensor ótico. Dois discos foliares ($0,69 \text{ cm}^2$ cada) foram amostrados da lâmina foliar por meio de um furador, entre a borda e a nervura central da folha (Figura 2). A obtenção dos teores de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila *total* e carotenoides foi determinado segundo a metodologia de Lichtenthaler (1987), o método se baseia na utilização de 1 mL do extrato de clorofila obtido à partir da extração por solvente dimetil-formamida (DMF). A solução foi mantida protegida da luz durante 24 h para a completa extração. Logo após realizou-se a leitura de absorbância em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 470, 645 e 663 nm; a leitura foi realizada em 1mL de extrato de clorofila diluído em 1mL de água deionizada.



Figura 5. Extração dos discos foliares e recipiente protegido da luz.

5.6.1.3 Teor relativo de água nas folhas (TRA)

No laboratório foram extraídos dois discos ($0,69 \text{ cm}^2$ cada) das folhas e determinou-se a massa do tecido fresco (W_f) dos discos em balança analítica de precisão. A massa do tecido túrgido (W_t) foi obtida após a reidratação dos discos em água deionizada por 24 h (Figura 3). A massa do tecido seco (W_s) foi obtida depois que os discos foram secos por 48 h a 80°C em estufa de circulação de ar forçada. O TRA foi calculado por intermédio da equação 1, conforme a metodologia apresentada por Jamaux et al. (1997):

$$\text{TRA} = [(W_f - W_s) \times (W_t - W_s)^{-1}] \times 100 \quad (1)$$



Figura 6. Recipiente contendo água deionizada e discos foliares para determinação do TRA da folha.

5.6.1.4 Tolerância protoplasmática

A avaliação da tolerância protoplasmática (liberação de eletrólitos) ocorreu por meio da determinação indireta. Com essa metodologia é possível inferir sobre a tolerância protoplasmática celular a deficiência hídrica, por meio da quantidade de eletrólitos liberados pelo tecido foliar em água deionizada, medida pela condutividade elétrica da solução. Para tanto, foram coletados 10 discos foliares com 0,69 cm² de diâmetro, provenientes de folhas totalmente expandidas do terço superior de cada planta. Os discos coletados foram lavados três vezes, com água deionizada, e em seguida colocados em tubos de ensaio com 10 mL de água deionizada. Foi realizada uma leitura de condutividade elétrica 24 horas depois da incubação, considerada como sendo a condutividade livre (CL) (Figura 4). Posteriormente os discos foram colocados em banho Maria a 60°C por três horas, e então foi realizada uma nova leitura de condutividade elétrica da solução, que é considerada a condutividade total (CT). O extravasamento de eletrólitos foi expresso como a porcentagem de condutividade inicial em relação à condutividade total após o aquecimento por 3 horas a 60°C, segundo a equação 2 descrita por Scotti Campos (1997):

$$\text{Extravasamento (\%)} = (\text{CL/CT}) \times 100 \quad (2)$$

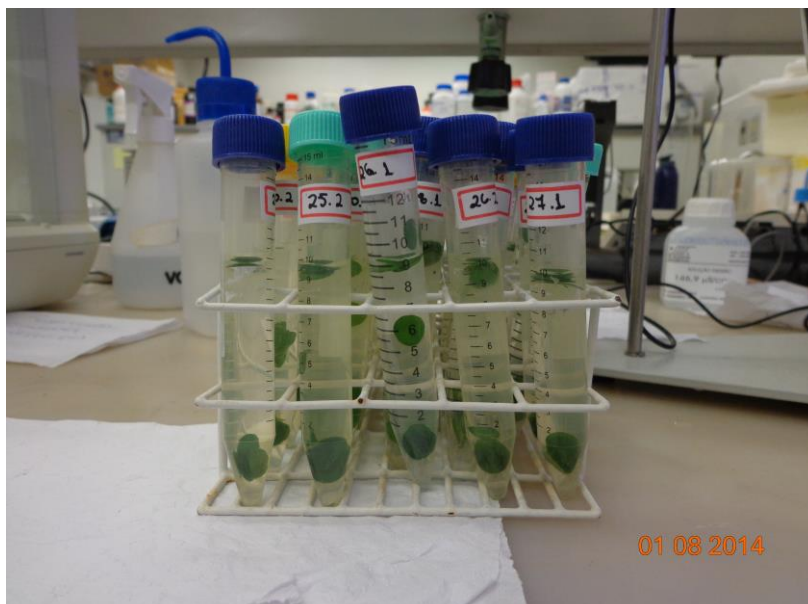


Figura 7. Recipientes contendo água deionizada e discos foliares para determinação do extravasamento de membranas.

5.6.2 Variáveis morfológicas

As avaliações morfológicas ocorreram ao final do ciclo da cultura (161 DAS), período em que todas as plantas da parcela foram colhidas. A colheita ocorreu nos dias 13 e 14 de outubro de 2014.

5.6.2.1 Altura de planta

A determinação da altura da planta ocorreu entre a superfície do solo e o ápice da planta, por meio de fita métrica.

5.6.2.2 Número de capítulos por planta

Contagem do número de capítulos por planta.

5.6.2.3 Massa de matéria seca

As plantas foram retiradas das caixas e separadas em parte aérea e raiz. As partes da planta foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 72 horas, até atingirem massa constante. Em seguida, com uma balança de precisão foi determinada:

- Massa seca de raízes (g planta⁻¹);
- Massa seca da parte aérea (os capítulos não foram contabilizados) (g planta⁻¹);
- Massa seca de capítulos (g planta⁻¹);
- Razão raiz/parte aérea: foi obtida pelo quociente entre a massa seca de raízes pela massa seca da parte aérea (os capítulos não foram contabilizados).

5.6.2.4 Produtividade de grãos em kg ha⁻¹

Obtida por intermédio da colheita das plantas da parcela.

5.6.2.5 Índice de colheita em g g⁻¹

Obtida por meio da divisão da massa de grãos pela massa total da planta (parte aérea + grãos).

5.6.2.6 Peso de mil grãos

Obtida por meio da pesagem de oito sub-amostras de 100 grãos por parcela, cujas massas foram determinadas em balança analítica de precisão, sendo tais procedimentos efetuados segundo prescrições estabelecidas pelas Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 1992).

5.7 Análise dos resultados

5.7.1 Análise estatística fatorial

Os dados utilizados para esta análise foram coletados na terceira época de avaliação, ou seja, após 18 dias de reidratação das plantas submetidas anteriormente ao estresse por deficiência hídrica.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade e posteriormente à análise de variância, e teste de Tukey. Considerou-se significativo quanto $P < 0,05$.

As análises foram executadas utilizando-se o programa estatístico Minitab 16.

5.7.2 Análise multivariada

Os dados obtidos durante as três épocas de avaliação foram submetidos à análise dos componentes principais (PCA) e similaridade genética, calculada utilizando a distância generalizada de Mahalanobis, que foi obtida por meio da equação 3:

$$D_{ii'}^2 = \delta' \Psi^{-1} \delta \quad (3)$$

Onde: $D_{ii'}^2$: é a distância de Mahalanobis entre os genótipos i e i' ; Ψ : matriz de variâncias e covariâncias residuais (dimensão 5); informação necessária apenas para o cálculo da distância de Mahalanobis (CRUZ; CARNEIRO, 2006). $\delta = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_v]$, sendo: $d_j = Y_{ij} - Y_{i'j}$; d_v = representa a diferença entre medias de dois genótipos i e i' para uma dada característica j ; Y_{ij} : é a média do i -ésimo genótipo em relação a j -ésima variável.

Essas análises foram executadas utilizando-se o programa estatístico Minitab 16.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Componentes de produção

Efeito significativo para as fontes de variação linhagens e regime hídrico foi observado em relação à produtividade, índice de colheita, peso de mil grãos e número de capítulos por planta (Tabela 5). Interação significativa entre os fatores foi verificada somente para a variável índice de colheita (Tabela 5).

Tabela 5. Análise de variância dos componentes de produção, número de capítulos por planta, índice de colheita (g g⁻¹), peso de mil grãos (g) e produtividade (kg ha⁻¹) em cártamo após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação. Botucatu - SP, 2014.

Fonte de variação	GL	Componentes de produção			
		Nº capítulos planta ⁻¹	Índice de colheita (g g ⁻¹)	Peso de mil grãos (g)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Linhagem (L)	5	5,24 **	9,71 **	28,47 **	4,02 **
Regime hídrico (Rh)	1	9,04 **	16,47 **	17,35 **	19,87 **
L x Rh	5	1,63 ^{ns}	2,57 *	1,68 ^{ns}	2,19 ^{ns}
CV (%)		21,77	24,17	14,33	31,99

G.L.: graus de liberdade; ns: não significativo; *: significativo ($P < 0,05$); **: significativo ($P < 0,01$); C.V.: coeficiente de variação.

De modo geral, o tratamento controle apresentou número de capítulos por planta variando entre 8,9 a 13,3, enquanto que no tratamento com deficiência hídrica seguida de reidratação apresentaram valores médios entre 7,5 a 11,2 (Tabela 6). Bayyavas et al. (2011) obtiveram valores entre 19,5 a 11,7. Kose (2013) obteve valores entre 8,5 a 16 na condição de sequeiro e entre 12,6 a 26,4 em condições irrigadas.

Tabela 6. Desdobramento da interação entre seis linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para número de capítulos por planta. Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Número de capítulos por planta		Médias
	-D	+D	
IMA 02	13,33 ± 0,74	9,84 ± 1,77	11,58 A
IMA 04	9,24 ± 2,54	7,64 ± 1,09	8,44 B
IMA 10	11,34 ± 2,66	9,53 ± 1,41	10,43 AB
IMA 14	10,06 ± 0,95	11,20 ± 1,19	10,63 AB
IMA 16	8,88 ± 2,20	7,48 ± 0,68	8,18 B
IMA 21	10,21 ± 0,68	8,81 ± 1,95	9,51 AB
Médias	10,51 a	9,08 b	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Segundo Weiss (2000), as cultivares melhoradas de cártamo, em boas condições de desenvolvimento, produzem de 12 a 14 capítulos por planta. Por outro lado, esses valores estão abaixo da faixa de valores encontrados por Silva (2013), que obteve entre 10 a 20 capítulos por planta.

Este parâmetro é um relevante componente de produção, já que, normalmente, plantas com maior número de capítulos produzem mais sementes e consequentemente possuem maiores produtividades. O número de capítulos por planta é um dos fatores que diretamente influencia na produtividade (BAYYAVAS et al., 2011; STEER; HARRIGAN, 1986).

Hajghani et al. (2009) e Zoz (2012), avaliando componentes de produção e produtividade do cártamo, obtiveram alta correlação fenotípica positiva e significativa entre número de ramos por planta e número de capítulos por planta,

concluindo que para seleção de genótipos de cártamo com maior produtividade de grãos, deve-se realizar a seleção de plantas com maior número de ramos e capítulos por planta.

Em relação ao índice de colheita, no presente estudo foi observada variação nos valores entre 0,23 a 0,44 g g⁻¹ no tratamento controle e entre 0,27 a 0,45 g g⁻¹ no tratamento com estresse seguido de reidratação (Tabela 7). Esses valores foram maiores que os observados por Zoz (2012), que encontrou entre 0,10 a 0,28 g g⁻¹ em plantas sob condição de campo.

Por meio desses resultados podemos observar que os valores aumentaram para a maioria das linhagens no tratamento com deficiência hídrica seguido de reidratação, pois somente as linhagens IMA 02 e IMA 21 não apresentaram diferença quando comparado com o controle (Tabela 7). A maior taxa de aumento após o tratamento de deficiência hídrica seguido de reidratação foi encontrado na linhagem IMA 04, com acréscimo de 45,2% no índice de colheita. As linhagens IMA 10, IMA 14 e IMA 16 apresentaram aumento de 33,1, 16,3 e 41,6%, respectivamente. A linhagem IMA 04 teve aumento de 45,2% (Tabela 7).

Tabela 7. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para índice de colheita (g g⁻¹). Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Índice de colheita (g g ⁻¹)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	0,442 ± 0,07 Aa	0,425 ± 0,06 Ab	0,433
IMA 04	0,312 ± 0,09 ABCDb	0,453 ± 0,04 Aa	0,382
IMA 10	0,332 ± 0,05 ABCDb	0,442 ± 0,03 Aa	0,387
IMA 14	0,236 ± 0,04 Db	0,274 ± 0,01 Ca	0,255
IMA 16	0,297 ± 0,08 BCD b	0,421 ± 0,03 Ab	0,359
IMA 21	0,417 ± 0,01 ABCa	0,428 ± 0,08 ABa	0,422
Médias	0,339	0,407	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Lovelli et al. (2007) não observaram diferença nos valores de índice de colheita, em média de 0,38 g g⁻¹, para os tratamentos de irrigação suprindo 100,

75, 50, 25 e 0% da evapotranspiração da cultura do cártamo. Por outro lado, alguns autores obtiveram aumento no valor de índice de colheita para trigo (ZHANG et al., 1998) e milho (KANG et al., 2000; SOARES, 2010) quando submetidos ao estresse hídrico.

Jabbari et al. (2010) verificaram que o índice de colheita é maior para genótipos de cártamo nos tratamentos que receberam mais irrigação, ao contrário do reportado. Segundo o autor, a redução do índice de colheita em condições de seca se deve ao fato dos efeitos da seca no crescimento vegetativo.

O índice de colheita do cártamo é relativamente baixo se comparado a outras culturas produtoras de grãos, como por exemplo, a cultura do girassol que é da mesma família botânica e que tem o índice de colheita entre 0,30 a 0,48 g g⁻¹ (SÁ BRAZ; ROSSETTO, 2009). No cártamo normalmente esse valor não ultrapassa 0,30 (SILVA, 2013).

O índice de colheita constitui na fração dos grãos produzidos em relação à matéria seca total da planta, e pode ser empregado em programas de melhoramento genético e de avaliação de desempenho de genótipos submetidos a diferentes condições climáticas (DONALD; HAMBLIN, 1976). Ainda, o índice de colheita poderá identificar a habilidade de um genótipo combinar elevada capacidade de produção total e de destinar a matéria seca acumulada aos componentes de interesse econômico, assim, o maior interesse estará na seleção de plantas com índice de colheita maiores, pois essas plantas investem mais na formação da semente do que nas estruturas vegetais (DONALD; HAMBLIN, 1976).

Os valores de peso de mil grãos apresentaram uma pequena redução nas linhagens sobre estresse seguido de reidratação quando comparado ao controle, não havendo, porém, diferença das linhagens dentro do estresse (Tabela 8). Os valores variaram entre 38,0 a 58,2 g para o tratamento controle e entre 37,9 a 50,4 g para o tratamento com deficiência hídrica seguida de reidratação (Tabela 8). Estes valores obtidos são bastante elevados tendo em vista que normalmente as médias dessa característica situam-se em torno de 37 g, e dificilmente ultrapassam os 40 g, como relatado por Ozurk, Ozer e Polat (2008) e Bayyavas et al. (2011).

Esses valores de peso de mil grãos estão de acordo com o reportado por Kose (2013), que encontrou valores entre 38 a 56,8 g em condições não irrigadas e entre 39,9 a 59,4 g em condições irrigadas.

Tabela 8. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para peso de mil grãos (g). Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Peso de mil grãos (g)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	51,53 ± 0,90	44,93 ± 2,60	48,23 B
IMA 04	58,16 ± 7,74	50,38 ± 1,46	54,27 A
IMA 10	37,98 ± 3,57	37,90 ± 1,47	37,94 D
IMA 14	43,04 ± 4,05	40,25 ± 1,03	41,64 CD
IMA 16	50,37 ± 2,46	47,23 ± 2,07	48,80 B
IMA 21	43,83 ± 0,33	41,60 ± 2,34	42,71 C
Médias	47,48 a	43,71 b	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O peso de mil grãos é um dos fatores mais importantes que afeta a produtividade de sementes. Além disso, o material genético e os fatores ambientais têm influência sobre essa característica (BAYYAVAS et al., 2011). Porém, em alguns casos, a redução dos valores pode ser compensada pelo número de capítulos por planta ou pelo diâmetro do capítulo (SILVA, 2013).

Istanbulluoglu (2009) avaliou variedades de cártamo em condições de deficiência hídrica e obteve diferença significativa para o peso de mil grãos. A maior média obtida foi de 55 g, no tratamento irrigado, e a menor média foi de 36 g, no tratamento não irrigado.

Após 18 dias de reidratação, as linhagens não diferiram dentro dos tratamentos para a variável produtividade, porém pode-se constatar uma tendência de redução quando comparado com o controle (Tabela 9). Os valores de produtividade variaram entre 1240,2 a 2008,8 kg ha⁻¹ para o tratamento controle e entre 680,4 a 1576,8 kg ha⁻¹ para o tratamento com estresse (Tabela 9).

A linhagem IMA 21 mostrou maior produtividade no tratamento controle, 2008,8 kg ha⁻¹, porém não se destacou no tratamento com deficiência hídrica, apresentando redução de 44,7%, produzindo 1109,7 kg ha⁻¹ (Tabela 9). A linhagem IMA 16 teve a menor taxa de redução em produtividade de 3,3% no tratamento sob deficiência

hídrica seguida de reidratação, com produtividade de 1576,8 kg ha⁻¹, seguida pela linhagem IMA 14, com redução de 7,3% e produtividade de 1148,4 kg ha⁻¹. A linhagem que apresentou a maior taxa de redução foi a IMA 02, de 49,2%, que corresponde à produtividade em condição de estresse, de 680,4 kg ha⁻¹. Nas linhagens IMA 04 e IMA 10 foram observadas reduções, respectivamente, de 17,6 e de 30,4% (Tabela 9).

Tabela 9. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para produtividade (kg ha⁻¹). Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Produtividade (kg ha ⁻¹)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	1339,6 ± 98,20	680,4 ± 314	1010,0 B
IMA 04	1542,1 ± 490	1270,1 ± 234	1406,1 AB
IMA 10	1550,5 ± 440	1079,1 ± 43,80	1314,8 AB
IMA 14	1240,2 ± 231	1148,4 ± 98,30	1194,3 AB
IMA 16	1632,0 ± 610	1576,8 ± 179	1604,4 A
IMA 21	2008,8 ± 105	1109,7 ± 361	1559,3 A
Médias	1552,2 a	1144,1 b	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O cártamo é uma cultura rústica e possui ampla adaptabilidade a diferentes condições ambientais, produzindo de 1000 a 3000 kg ha⁻¹ mesmo em condições adversas como escassez de chuva ou irrigação (SILVA et al., 2012). Silva (2013) avaliou acessos de cártamo em diferentes regiões, em condição de campo na estação seca, obtendo valores entre 900 a 1500 kg ha⁻¹ e Zoz (2012) obteve valores entre 471,2 a 1974,2 kg ha⁻¹ em condições de campo.

Ozturk, Ozer e Polat (2008) obtiveram valores entre 596 a 1298 kg ha⁻¹ no tratamento sem irrigação em diferentes genótipos. Lovelli et al. (2007) afirmaram que a produtividade de grãos cai significativamente nas plantas em condições de estresse hídrico severo.

De acordo com Zoz (2012), para a obtenção de genótipos de cártamo com maior produtividade de grãos deve-se realizar a seleção simultânea e indireta

de plantas com maior número de ramos e capítulos por planta, diâmetro de caule, massa de matéria seca de planta e índice de colheita.

6.2 Variáveis fisiológicas

Efeito significativo para a fonte de variação linhagens foi observado em relação a teor relativo de água na folha (TRA), potencial de água na folha (Ψ_w) e índice SPAD (Tabela 10). Em relação à fonte de variação regime hídrico houve diferença significativa para todas as variáveis fisiológicas (Tabela 10). Ocorreu interação significativa entre os fatores somente para a variável índice SPAD (Tabela 10).

Tabela 10. Análise de variância do teor relativo de água na folha (TRA), potencial hídrico foliar (Ψ_w), índice SPAD e extravasamento de eletrólitos em cártamo, após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação. Botucatu – SP, 2014.

Fonte de variação	GL	Variáveis fisiológicas			
		TRA (%)	Ψ_w (KPa)	Índice SPAD	Extravasamento de eletrólitos (%)
Linhagem (L)	5	2,56 *	5,75 **	12,01 **	1,67 ^{ns}
Regime hídrico (Rh)	1	3,88 ^{ns}	66,48 **	36,08 **	13,22 **
L x Rh	5	1,18 ^{ns}	1,78 ^{ns}	3,71 **	1,46 ^{ns}
CV (%)		6,14	26,94	16,14	28,46

G.L.: graus de liberdade; ns: não significativo; *: significativo ($P < 0,05$); **: significativo ($P < 0,01$); C.V.: coeficiente de variação.

O teor relativo de água não diferiu nas linhagens após a deficiência hídrica seguida de reidratação em relação ao tratamento controle, indicando que as linhagens recuperaram o TRA das folhas (Tabela 11).

A manutenção do TRA é um indicador do grau de hidratação das células e do tecido foliar, sendo um fator crucial para o ótimo funcionamento fisiológico da planta como o controle estomático (GORAI et al., 2010). No início do estresse por deficiência hídrica ocorre a redução da taxa de fotossíntese, pois os estômatos se fecham em resposta ao declínio do turgor das células da folha, à queda do potencial de água nas folhas ou à baixa umidade relativa do ar (YORDANOV et al., 2003). Segundo Eslam (2011), o TRA pode ser utilizado como ferramenta para selecionar genótipos de cártamo em condições de seca.

Tabela 11. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para teor relativo de água na folha (%). Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Teor relativo de água na folha (%)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	88,35 ± 0,06	85,08 ± 0,06	86,71 AB
IMA 04	90,82 ± 0,05	86,16 ± 0,01	88,49 A
IMA 10	84,72 ± 0,01	84,44 ± 0,06	85,88 AB
IMA 14	86,63 ± 0,04	85,99 ± 0,02	87,23 AB
IMA 16	84,09 ± 0,04	77,42 ± 0,05	80,75 B
IMA 21	88,51 ± 0,04	83,47 ± 0,02	85,99 AB
Médias	87,18 a	84,50 a	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Canavar et al. (2014), avaliando genótipos de cártamo em condição de deficiência hídrica, obtiveram redução em média de 3,62% no TRA no tratamento com estresse hídrico, porém sem diferença estatística entre os genótipos de cártamo. Segundo o autor, uma explicação possível para a redução do TRA nas folhas pode ser a limitação do abastecimento de carbono causado pelo estresse hídrico. O autor também afirma que a manutenção do TRA mesmo em condição de estresse pode ser considerada um mecanismo para evitar a dessecação.

As linhagens não recuperaram os valores de potencial de água (Ψ_w) após a reidratação (Tabela 12). As linhagens IMA 14 e IMA 21 tiveram menor taxa de redução de Ψ_w na reidratação quando comparado ao controle, apresentando reduções de 18,1 e 22,5%, respectivamente. A linhagem IMA 16 teve maior taxa de redução após a reidratação, 82,2%, em comparação ao controle, a baixa taxa de recuperação do Ψ_w pode indicar susceptibilidade ao estresse. As linhagens IMA 04 e IMA 10 reduziram 61,0 e 60,0%, respectivamente (Tabela 12). A linhagem IMA 02 apresentou valores intermediários, isto é, 45,7% de redução após a deficiência hídrica seguida de reidratação.

Tabela 12. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para potencial de água na folha (Ψ_w). Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Potencial de água na folha (MPa)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	-0,8750 $\pm$ 1,70	-1,2750 $\pm$ 3,25	-1,075 B
IMA 04	-0,8350 $\pm$ 0,83	-1,3450 $\pm$ 1,02	-1,090 B
IMA 10	-0,850 $\pm$ 1,19	-1,360 $\pm$ 0,99	-1,105 B
IMA 14	-1,020 $\pm$ 2,20	-1,205 $\pm$ 2,05	-1,112 B
IMA 16	-0,8150 $\pm$ 1,30	-1,4850 $\pm$ 2,85	-1,150 B
IMA 21	-1,330 $\pm$ 1,24	-1,630 $\pm$ 1,36	-1,480 A
Médias	-0,954 b	-1,383 a	

Média $\pm$ Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O Ψ_w indica o seu estado energético, cujos gradientes explicam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera (BERGONCI et al., 2000) de modo que, variações no potencial hídrico da folha podem afetar a assimilação do carbono da planta (HSIAO, 1973). Isto porque, se a planta perde água a uma taxa superior à sua capacidade de absorção e transporte, o potencial hídrico da folha diminui, levando ao fechamento dos estômatos e redução da fotossíntese.

Hojati et al. (2011) avaliando cultivares de cártamo obtiveram redução de 16 a 19% do TRA e de 52 a 69% do Ψ_w em condições de estresse hídrico severo, 55% da capacidade de campo.

As linhagens mostraram aumento nos valores de índice SPAD quando submetidas à deficiência hídrica seguida de reidratação. Os valores médios para esta variável ficaram entre 45,4 a 64,9 índice SPAD no tratamento controle e entre 53,8 a 67,4 índice SPAD no tratamento com deficiência hídrica seguido de reidratação (Tabela 13).

A linhagem IMA 14 apresentou o maior taxa de aumento, de 48,4%, seguida da linhagem IMA 04 com acréscimo de 21,2%. As linhagens IMA 02, IMA 10, IMA 16 e IMA 21 apresentaram aumento de, respectivamente, 6,3, 11,6, 8,5 e 10,0% (Tabela 13).

Tabela 13. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para índice SPAD. Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Índice SPAD		Médias
	-D	+D	
IMA 02	52,13 ± 5,75 Bb	55,44 ± 5,71 BCDa	53,78
IMA 04	54,40 ± 2,85 ABb	65,96 ± 7,50 ABCa	60,18
IMA 10	64,91 ± 7,88 Ab	72,49 ± 3,78 Aa	68,70
IMA 14	45,38 ± 1,75 Bb	67,38 ± 4,67 ABa	56,38
IMA 16	49,50 ± 5,69 Bb	53,75 ± 6,86 CDa	51,62
IMA 21	50,67 ± 2,79 Bb	55,75 ± 1,58 BCDa	53,21
Médias	52,83	61,79	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Segundo Canavar et al. (2014), os valores de índice SPAD mostraram que a deficiência hídrica causou mudanças significativas nas folhas de cártamo. Os dados obtidos pelo autor foram semelhantes aos obtidos pelo presente estudo, os valores aumentaram significativamente em condição de estresse. O autor também afirma que os valores se alteram dependendo da duração do estresse.

Bomfim-Silva et al. (2015), também verificaram efeito significativo no índice SPAD em diferentes disponibilidades hídricas, no tratamento controle o índice SPAD de plantas de cártamo foi de 44,4, e em deficiência hídrica o índice teve um aumento para 50,4. Os autores concluíram que o cártamo tem alta tolerância à deficiência hídrica do solo.

O maior efeito da deficiência hídrica seguida de reidratação para o extravasamento de eletrólitos foi verificado na linhagem IMA 02, que apresentou aumento de 64,4% do extravasamento de eletrólitos da célula após submetido ao tratamento com deficiência hídrica seguido de reidratação (Tabela 14), um indicativo que essa linhagem foi mais sensível a deficiência hídrica, mantendo autos danos na membrana celular mesmo depois da reidratação, não se recuperando totalmente do estresse.

O extravasamento de eletrólitos pode aumentar devido à formação de espécies reativas de oxigênio, que reduzem a atividade das enzimas e causam peroxidação de lipídios e assim, resultando no rompimento da membrana celular, esse rompimento induz, conseqüentemente, em limitações na fotossíntese, afetando os componentes fotossintéticos (CARVALHO, 2010).

Tabela 14. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para extravasamento de eletrólitos (%). Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Extravasamento de eletrólitos (%)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	27,93 ± 0,05	45,97 ± 0,06	36,95 A
IMA 04	25,46 ± 0,03	36,67 ± 0,12	31,06 A
IMA 10	32,73 ± 0,09	32,88 ± 0,15	31,80 A
IMA 14	21,86 ± 0,03	30,46 ± 0,05	26,16 A
IMA 16	29,97 ± 0,06	31,51 ± 0,04	30,74 A
IMA 21	27,80 ± 0,04	36,57 ± 0,04	32,18 A
Médias	27,62 b	35,67 a	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Nas linhagens IMA 04, IMA 14 e IMA 21 foram observadas taxas de aumento de 44,0, 39,3 e 31,5%, respectivamente. As linhagens IMA 10 e IMA 16 apresentaram as menores taxas de acréscimos, 0,4 e 5,1%, respectivamente (Tabela 14), o que sugere que as linhagens IMA 10 e IMA 16 recuperaram os danos após o período de reidratação.

A técnica de extravasamento de eletrólitos permite avaliar a integridade das membranas celulares visto que quanto menor a condutividade elétrica da solução, menor é a quantidade de eletrólitos que extravasam das membranas, indicando seu grau de integridade. Os danos nas membranas celulares podem ser um dos primeiros indícios de estresse, no entanto, alguns fatores, como o estado nutricional da planta e fatores genéticos, podem influenciar nesses danos (BAJJI et al., 2001).

Para pigmentos fotossintéticos foi observada diferença significativa para a fonte de variação linhagens em relação à clorofila *a*, clorofila *b*, clorofilas *totais* e carotenoides (Tabela 15). Em relação à fonte de variação regime hídrico houve diferença significativa para todas as variáveis. Ocorreu interação entre os fatores para todas as variáveis (Tabela 15).

Tabela 15. Análise de variância do teor de clorofila *a* ($\mu\text{g cm}^{-2}$), clorofila *b* ($\mu\text{g cm}^{-2}$), clorofilas totais ($\mu\text{g cm}^{-2}$) e carotenoides ($\mu\text{g cm}^{-2}$), em cártamo após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação. Botucatu – SP, 2014.

Fonte de variação	GL	Pigmentos fotossintéticos			
		Chl <i>a</i> ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	Chl <i>b</i> ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	Chl <i>total</i> ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	Carotenoides ($\mu\text{g cm}^{-2}$)
Linhagem (L)	5	10,49 **	9,19 **	10,43 **	9,76 **
Regime hídrico (Rh)	1	20,38 **	6,49 **	16,71 **	14,46 **
L x Rh	5	3,64 **	4,80 **	4,03 **	4,27 **
CV (%)		23,97	25,27	24,03	20,60

G.L.: graus de liberdade; ns: não significativo; *: significativo ($P < 0,05$); **: significativo ($P < 0,01$); C.V.: coeficiente de variação.

A deficiência hídrica seguida de reidratação promoveu aumento nos valores de clorofila *a* para todas as linhagens, e de clorofila *b*, clorofilas *totais* e carotenoides para a maioria das linhagens.

Tabela 16. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para clorofila *a*. Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Clorofila <i>a</i> ($\mu\text{g cm}^{-2}$)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	12,71 $\pm$ 3,35 Bb	16,68 $\pm$ 0,45 BCa	14,69
IMA 04	16,03 $\pm$ 2,85 ABb	18,14 $\pm$ 1,04 ABCa	17,08
IMA 10	20,36 $\pm$ 3,75 Ab	22,86 $\pm$ 1,52 Aa	21,61
IMA 14	12,23 $\pm$ 1,03 Bb	21,60 $\pm$ 2,41 ABa	16,91
IMA 16	13,36 $\pm$ 1,52 Bb	13,44 $\pm$ 3,85 Ca	13,40
IMA 21	16,45 $\pm$ 2,68 ABb	17,56 $\pm$ 1,89 ABCa	17,00
Médias	15,19	18,38	

Média $\pm$ Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A linhagem IMA 14 apresentou maiores taxas de aumento de clorofila *a* na reidratação após a deficiência hídrica, $21,6 \mu\text{g cm}^{-2}$ (76,6%), seguida da linhagem IMA 02, com aumento de $3,9 \mu\text{g cm}^{-2}$ (31,2%) (Tabela 16), essa capacidade de aumento nos teores de clorofila *a* na recuperação dessas linhagens, sugere mecanismo mais eficiente na proteção da planta contra danos no aparato fotoquímico. Enquanto as linhagens IMA 16 e IMA 21 tiveram as menores taxas de acréscimos, 0,5 e 6,7%, respectivamente. As linhagens IMA 04 e IMA 10 aumentaram 13,1 e 12,2%, respectivamente.

Para teor de clorofila *b*, as linhagens IMA 14 e IMA 02 também tiveram as maiores taxas de aumento, de $3 \mu\text{g cm}^{-2}$ (84,2%) e $0,9 \mu\text{g cm}^{-2}$ (21,3%), respectivamente (Tabela 17). As linhagens IMA 10 e IMA 21 tiveram os menores acréscimos, 5,9 e 0,5%, respectivamente. Enquanto as linhagens IMA 04 e IMA 16 tiveram reduções significativas nos valores, de $0,18 \mu\text{g cm}^{-2}$ (3,5%) e $0,47 \mu\text{g cm}^{-2}$ (11,4%), respectivamente.

Tabela 17. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para clorofila *b*. Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Clorofila <i>b</i> ($\mu\text{g cm}^{-2}$)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	$3,95 \pm 1,24$ Bb	$4,80 \pm 0,43$ ABa	4,37
IMA 04	$5,24 \pm 0,46$ ABa	$5,05 \pm 0,23$ ABb	5,14
IMA 10	$6,21 \pm 0,97$ Ab	$6,57 \pm 0,41$ Aa	6,39
IMA 14	$3,61 \pm 0,46$ Bb	$6,67 \pm 0,82$ Aa	5,14
IMA 16	$4,06 \pm 0,78$ Ba	$3,59 \pm 1,13$ Bb	3,72
IMA 21	$5,41 \pm 1,14$ ABa	$5,44 \pm 0,97$ ABa	5,42
Médias	4,74	5,35	

Média $\pm$ Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O maior efeito da deficiência hídrica seguido de reidratação para o teor de clorofilas *totais* foi verificado na linhagem IMA 16, que apresentou redução no teor

de $0,40 \mu\text{g cm}^{-2}$ (2,2%) (Tabela 18). Nas demais linhagens foi verificado aumento do teor de clorofilas *totais*. A linhagem IMA 14 apresentou maiores médias no teor de clorofilas totais quando comparada com as outras linhagens com acréscimo de $12,42 \mu\text{g cm}^{-2}$ (78,3%), ou seja, apresenta maior capacidade de síntese de clorofila após período de estresse, o que pode ser um indicativo de plantas mais tolerantes ao estresse e com eficiente recuperação de pigmentos fotossintéticos.

A linhagem IMA 02 apresentou aumento no teor de clorofilas totais na reidratação, de $4,82 \mu\text{g cm}^{-2}$ (28,9%). As linhagens IMA 04 e IMA 10 tiveram aumentos semelhantes de, respectivamente, $1,93 \mu\text{g cm}^{-2}$ (9,0%) e $2,87 \mu\text{g cm}^{-2}$ (10,8%) (Tabela 18).

As clorofilas são responsáveis pela captação de energia luminosa utilizada na fotossíntese, desempenhando papel fundamental nesse processo e, consequentemente, ao crescimento e adaptabilidade a diferentes ambientes (SCHLEMMER et al., 2005). O conteúdo de clorofila nas folhas é uma variável fundamental para a compreensão das respostas de uma planta ao ambiente em que ela está inserida e, portanto, é um indicador em potencial do grau de estresse, pois tem papel direto no processo fotossintético de captação de luz e início do transporte de elétrons (ZARCOTEJADA et al., 2002). O potencial fotossintético é diretamente proporcional à quantidade de clorofila presente no tecido foliar (SCHLEMMER et al., 2005).

Amini et al. (2013), obtiveram redução nos valores de clorofila *a*, *b*, *totais* e carotenoides após tratamento com deficiência hídrica para os genótipos de cártamo susceptíveis ao estresse e aumento nos teores para os genótipos tolerantes. O autor afirma que a redução do teor de clorofila está associada a perdas na fotossíntese, e consequentemente leva a uma menor produtividade. A linhagem IMA 14 podem ser consideradas tolerantes ao estresse por apresentar aumento nos índices de pigmentos fotossintéticos.

A deficiência hídrica geralmente promove a degradação da clorofila, que pode ser causada pela foto-inibição ou redução da eficiência fotossintética ou por outros processos, como a divisão e expansão celular (ARAÚJO; DEMINICIS, 2009). Desta maneira, é esperado que linhagens que mantenham maiores conteúdos desses pigmentos sob deficiência hídrica têm melhor capacidade de tolerar essa condição (O'NEILL et al., 2006).

Tabela 18. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para clorofilas totais. Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Clorofilas <i>totais</i> ($\mu\text{g cm}^{-2}$)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	16,67 $\pm$ 4,60 Bb	21,48 $\pm$ 0,79 BCa	19,03
IMA 04	21,27 $\pm$ 3,26 Bb	23,20 $\pm$ 1,23 ABCa	22,23
IMA 10	26,57 $\pm$ 4,72 Ab	29,44 $\pm$ 1,88 Aa	28,01
IMA 14	15,85 $\pm$ 1,49 Bb	28,27 $\pm$ 3,22 ABa	22,06
IMA 16	17,43 $\pm$ 2,29 Ba	17,03 $\pm$ 4,97 Cb	17,23
IMA 21	21,87 $\pm$ 3,80 ABb	23,01 $\pm$ 2,76 ABCa	22,44
Médias	19,94	24,73	

Média $\pm$ Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A linhagem IMA 16 apresentou redução no valor de carotenoides após a reidratação, de 0,40 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (2,2%) (Tabela 19), essas reduções de carotenoides e clorofilas nessa linhagem sugere que a planta não se recuperou totalmente do estresse após 18 dias de reidratação, o que pode ser um indicativo de maior sensibilidade à deficiência hídrica. As demais linhagens apresentaram aumento no teor de carotenoides, em que o menor acréscimo foi obtido pela linhagem IMA 21, com 0,18 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (2,9%), seguida pela linhagem IMA 04, com 0,49 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (8,7%), IMA 10, 0,87 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (12,6%), IMA 02, 0,90 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (16,0%) (Tabela 19).

Maior média de carotenoides foi observada na linhagem IMA 14 com aumento do teor de 2,92 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (64,9%) (Tabela 19). O que evidencia que a manutenção dos carotenoides nessa linhagem proporcionou maior proteção contra a fotooxidação durante a reidratação, mais um indicativo de recuperação ao estresse nessa linhagem.

Os carotenoides são pigmentos acessórios, e desempenham papel fundamental na proteção contra a foto-inibição do aparelho fotossintético, portanto são pigmentos importantes na prevenção contra os danos oxidativos causados pelo estresse (WAHID, 2007).

Tabela 19. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para carotenoides. Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Carotenoides ($\mu\text{g cm}^{-2}$)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	4,96 $\pm$ 0,99 Bb	5,75 $\pm$ 0,16 BCa	5,35
IMA 04	5,63 $\pm$ 0,87 ABb	6,12 $\pm$ 0,31 ABCa	5,87
IMA 10	6,91 $\pm$ 1,09 Ab	7,79 $\pm$ 0,47 Aa	7,35
IMA 14	4,50 $\pm$ 0,35 Bb	7,42 $\pm$ 0,87 ABa	5,96
IMA 16	4,99 $\pm$ 0,53 Ba	4,72 $\pm$ 1,15 Cb	4,85
IMA 21	5,87 $\pm$ 0,87 ABb	6,05 $\pm$ 0,57 ABCa	5,96
Médias	5,47	6,30	

Média $\pm$ Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

6.3 Variáveis morfológicas

Efeito significativo para a fonte de variação linhagens foi observado em relação à altura de planta, massa de matéria seca de parte aérea, raiz e capítulos e razão raiz/parte aérea (Tabela 20). Em relação à fonte de variação regime hídrico não houve diferença significativa somente para a variável razão raiz/parte aérea. Ocorreu interação significativa entre os fatores somente para as variáveis massa de matéria seca de parte aérea e raiz.

A altura de plantas variou entre 0,90 a 1,43 m no tratamento controle e 0,75 a 1,13 m no tratamento com deficiência hídrica seguida de reidratação (Tabela 21). Silva (2013) estudando plantas de cártamo em condições de campo obteve altura médias de 0,93 m. Em genótipos melhorados Gracia et al. (2010) observaram médias entre 0,90 m e 1,50 m em planta. Portanto, os valores desse estudo encontram-se dentro dos limites comumente observados nos genótipos.

Tabela 20. Análise de variância da altura de planta (m), massa de matéria seca de parte aérea (MMS PA), massa de matéria seca de raiz (MMS Raiz), massa de matéria seca de capítulos (MMS Cap) e razão raiz/parte aérea, em cártamo, após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação. Botucatu – SP, 2014.

Fonte de variação	GL	Variáveis morfológicas				
		Altura (m)	MMS PA (g)	MMS Raiz (g)	MMS Cap (g)	Razão raiz/parte aérea
Linhagem (L)	5	18,82 **	10,05 **	3,35 **	3,74 *	5,80 **
Regime hídrico (Rh)	1	84,08 **	75,81 **	116,87 **	39,38 **	1,03 ^{ns}
L x Rh	5	2,31 ^{ns}	2,64 *	3,83 **	1,70 ^{ns}	0,26 ^{ns}
CV (%)		18,15	46,11	44,82	42,47	31,27

G.L.: graus de liberdade; ns: não significativo; *: significativo ($P<0,05$); **: significativo ($P<0,01$); C.V.: coeficiente de variação.

A linhagem IMA 16 apresentou maior taxa de redução da altura após deficiência hídrica seguida de reidratação de 22,7% quando comparada com o controle (Tabela 21). A linhagem IMA 02 apresentou menor crescimento após a reidratação, com altura média de 0,88 m quando comparada com as demais linhagens. A linhagem IMA 21 teve a maior altura final no tratamento controle (1,43 m), e também no tratamento sob estresse (1,13 m) (Tabela 21).

Segundo Canavar et al. (2014), a seca causou diferença significativa na altura de planta com redução de 22 a 32%, e na massa de matéria seca da parte aérea com redução de 39 a 50% em genótipos de cártamo.

Camas et al. (2007) reportaram altura de planta de cártamo variando entre 0,74 a 1,38 m em condições de campo com baixa precipitação, Bayyavas et al. (2011) observaram alturas variando entre 0,99 a 1,20 m em região semi-árida em condições de campo. Os resultados obtidos no presente estudo estão de acordo com os autores mencionados.

A redução da altura da planta, em condições de deficiência hídrica, pode ocorrer devido à redução da expansão celular e o crescimento da célula, em resposta ao baixo turgor (OGNONNAYA et al., 2003; JALEEL et al., 2008).

Tabela 21. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para altura de planta (m). Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Altura de planta (m)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	0,905 ± 0,08	0,858 ± 0,06	0,881 D
IMA 04	1,215 ± 0,05	0,951 ± 0,04	1,083 C
IMA 10	1,278 ± 0,05	1,001 ± 0,06	1,139 BC
IMA 14	1,356 ± 0,10	1,065 ± 0,17	1,210 ABC
IMA 16	1,395 ± 0,09	1,077 ± 0,11	1,236 AB
IMA 21	1,435 ± 0,06	1,132 ± 0,11	1,283 A
Médias	1,264 a	1,014 b	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A redução da altura de planta e da área foliar pode ser considerada um mecanismo estratégico das plantas para evitar a seca (NAMIREMBE et al., 2008). No entanto, a redução da área foliar reduz a fotossíntese e, conseqüentemente, a produção de biomassa (CANAVAR et al., 2014).

A linhagem IMA 04 produziu maior quantidade de massa de matéria seca de parte aérea no tratamento controle (31,7 g planta⁻¹), porém apresentou a maior taxa de redução entre as linhagens para o tratamento com deficiência hídrica seguida de reidratação (61,0%) (Tabela 22). A linhagem IMA 14 teve a menor taxa de redução de 34,4%, e também o maior valor de massa de matéria seca de parte aérea no tratamento com deficiência hídrica seguida de reidratação de 18,5 g planta⁻¹ quando comparado com as demais linhagens. A linhagem IMA 16 apresentou redução em massa da parte aérea de 38,4%. Outras reduções foram constatadas nas linhagens IMA 02, IMA 10 e IMA 21 reduziram 40, 8, 51,3 e 44,0%, respectivamente (Tabela 22).

Para a variável massa de matéria seca de raízes, a linhagem IMA 16 foi a que apresentou menor taxa de redução após a reidratação, com taxas de 36,0%, e com valor de 2,3 g planta⁻¹ (Tabela 23). A linhagem IMA 04 apresentou maior taxa de redução após período de estresse seguido de reidratação, não se recuperando

completamente. A linhagem IMA 10 reduziu 61,0% após o tratamento com deficiência hídrica seguida de reidratação.

As linhagens IMA 14, IMA 16 e IMA 21 reduziram, respectivamente, 41,2, 46,4 e 47,9%, essas reduções sugerem que com 18 dias de reidratação não foram suficientes para a recuperação completa das raízes na maioria das linhagens (Tabela 23).

Tabela 22. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para massa de matéria seca de parte aérea (g planta⁻¹). Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Massa de matéria seca de parte aérea (g planta ⁻¹)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	14,20 ± 3,66 Ca	8,39 ± 3,63 Cb	11,29
IMA 04	31,74 ± 11,44 Aa	12,37 ± 2,01 Cb	22,05
IMA 10	29,99 ± 3,60 Aa	14,59 ± 1,13 Bb	22,29
IMA 14	28,18 ± 5,33 ABa	18,47 ± 2,51 Ab	23,32
IMA 16	24,01 ± 3,46 ABCa	14,77 ± 2,42 Bb	19,39
IMA 21	17,66 ± 1,14 BCa	9,88 ± 3,09 Cb	13,77
Médias	24,29	13,07	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Na variável massa de matéria seca de capítulos, a linhagem IMA 04 apresentou maior taxa de redução para o tratamento com deficiência hídrica seguida de reidratação, com decréscimo de 56,6%, e o maior valor (18,9 g planta⁻¹) para o tratamento controle (Tabela 24). A linhagem que obteve a menor taxa de redução foi a IMA 14, com 26,2%. As linhagens IMA 16, IMA 10, IMA 02 e IMA 21 reduziram 45,1, 43,6, 30,4 e 35,3% respectivamente.

Salem et al. (2013), avaliando genótipos de cártamo em condições de estresse hídrico moderado e severo, obtiveram redução de altura de planta e massa de matéria seca conforme a intensidade do estresse hídrico aumentou. Segundo os autores, em estresse moderado, a altura de plantas reduziu entre 9,2 a 9,4% e a massa de matéria seca entre 23 a 55%, enquanto que, em estresse severo, a altura reduziu entre 46 a 47% e a massa de matéria seca entre 56 a 70%.

Tabela 23. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para massa de matéria seca de raízes (g planta⁻¹). Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Massa de matéria seca de raízes (g planta ⁻¹)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	3,28 ± 0,26 Ba	1,75 ± 0,54 Bb	2,51
IMA 04	5,84 ± 1,58 Aa	1,91 ± 0,40 Bb	3,87
IMA 10	5,03 ± 1,19 ABa	1,96 ± 0,71 Bb	3,49
IMA 14	4,42 ± 0,82 ABa	2,59 ± 0,37 Ab	3,50
IMA 16	3,71 ± 0,46 Ba	2,37 ± 0,26 Ab	3,04
IMA 21	4,13 ± 0,41 ABa	2,15 ± 0,40 Bb	3,14
Médias	4,40	2,12	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 24. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para massa de matéria seca de capítulos (g planta⁻¹). Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Massa de matéria seca de capítulos (g planta ⁻¹)		Médias
	-D	+D	
IMA 02	13,69 ± 6,33	9,52 ± 1,50	11,60 AB
IMA 04	18,98 ± 6,94	8,23 ± 2,65	13,60 A
IMA 10	17,35 ± 0,63	9,77 ± 1,96	13,56 A
IMA 14	11,04 ± 2,70	8,13 ± 1,37	9,58 AB
IMA 16	12,10 ± 2,12	6,63 ± 0,81	9,36 AB
IMA 21	10,56 ± 1,69	6,83 ± 1,62	8,69 B
Médias	13,95 a	8,18 b	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A redução do acúmulo de matéria seca pelos vegetais em condições de estresse hídrico é devido aos mecanismos de aclimação do vegetal para evitar a perda

de água, por exemplo, redução da área foliar, e consequente redução da interceptação de radiação e redução da condutância estomática, e também a redução da assimilação de CO₂ e o acúmulo de biomassa (CAVATTE et al., 2011).

Segundo Hojati et al. (2011), a deficiência hídrica promoveu reduções nas variáveis massa de matéria seca de parte aérea de 15 a 25%, massa de matéria seca de raízes de 15% e altura de plantas de cârtamo de 25%. Resultados similares foram encontrados em girassol por Joel et al. (1997) que também encontraram redução nos valores de massa de matéria. A insuficiente disponibilidade de água para a planta de girassol pode afetar de forma diferenciada e variável os parâmetros de rendimento da cultura, principalmente o número de aquênios e a massa de matéria seca (GAZOLLA et al., 2011).

Em relação à razão raiz/parte aérea, as linhagens IMA 16 e IMA 21 apresentaram aumento da razão raiz/parte aérea para o tratamento com deficiência hídrica seguida de reidratação, de 4,5 e 0,58%, respectivamente, enquanto que as demais linhagens tiveram redução no valor quando submetido a deficiência hídrica seguida de reidratação (Tabela 25). A menor taxa de redução foi obtida pela linhagem IMA 02, com 4,4%, seguida da IMA 14 com redução de 9,2%, as linhagens IMA 04 e IMA 10 reduziram 17,5 e 20,5%, respectivamente.

Hojati et al. (2011), ao avaliarem linhagens de cârtamo em condições de deficiência hídrica, obtiveram valores mais altos de razão raiz/parte aérea nas plantas submetidas ao estresse, de 30 a 68% de aumento. Diversos estudos em diferentes culturas têm demonstrado o aumento na razão raiz/ parte aérea em plantas submetidas a períodos de deficiência de água (KRAMER; BOYER, 1995). Entretanto, Barros Júnior et al. (2006), em mamoneira, observaram que a razão raiz/ parte aérea não foi significativamente afetada pelo déficit hídrico, mantendo-se no mesmo patamar para todos os tratamentos.

Lawlor e Uprety (1993) afirmaram haver aumento da razão raiz/parte aérea em muitas culturas sob seca, o que é atribuído à grande alocação de carbono às raízes.

Tabela 25. Desdobramento da interação entre linhagens de cártamo submetidas aos regimes hídricos adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para razão raiz/parte aérea. Botucatu – SP, 2014.

Linhagem	Razão raiz/parte aérea		Médias
	-D	+D	
IMA 02	0,240 ± 0,05	0,230 ± 0,09	0,235 A
IMA 04	0,189 ± 0,02	0,156 ± 0,03	0,172 AB
IMA 10	0,168 ± 0,03	0,133 ± 0,04	0,150 B
IMA 14	0,157 ± 0,01	0,142 ± 0,02	0,149 B
IMA 16	0,155 ± 0,01	0,162 ± 0,01	0,158 B
IMA 21	0,235 ± 0,03	0,236 ± 0,09	0,235 A
Médias	0,190 a	0,176 a	

Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma linha para tratamentos dentro de linhagens (letras minúsculas), e na mesma coluna entre linhagens dentro de cada tratamento (letras maiúsculas), não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

6.4 Análise dos componentes principais

Foi feita a análise dos componentes principais (PCA) para cada época de avaliação, antes da imposição da deficiência hídrica, após 30 dias de deficiência hídrica e após 18 dias de reidratação. Dessa forma, buscou sumarizar todas as variáveis morfofisiológicas e assim verificar o padrão de comportamento das características estudadas.

As componentes 1 e 2 explicaram mais de 70% da alteração das variáveis estudadas (Tabela 26).

As variáveis índice SPAD, extravasamento de eletrólitos, conteúdo de clorofila *a*, conteúdo de clorofilas *totais* e carotenoides foram as mais significativas, ou seja, se destacaram na diferenciação das linhagens durante a deficiência hídrica e reidratação.

Vale destacar que a análise dos componentes principais evidencia que as variáveis não foram totalmente recuperadas após a reidratação (Figura 8).

Tabela 26. Coeficientes de correlação entre os componentes principais (CP1 e CP2) e as características fisiológicas, das linhagens de cârtamo (IMA 02, IMA 04, IMA 10, IMA 14, IMA 16 e IMA 21) em três épocas de avaliação: antes da deficiência hídrica, após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação. Botucatu – SP, 2014.

Variáveis	Componentes principais	
	CP1	CP2
Índice SPAD	-0,052	-0,457
Extravasamento de eletrólitos	-0,289	-0,405
TRA	0,287	0,362
Altura de plantas	0,302	0,337
Clorofila <i>a</i>	0,443	-0,147
Clorofila <i>b</i>	0,399	-0,308
Clorofilas <i>totais</i>	0,440	-0,190
Carotenóides	0,436	-0,144
Variância (%)	52,0	25,7
Variância acumulada (%)	52,0	77,7

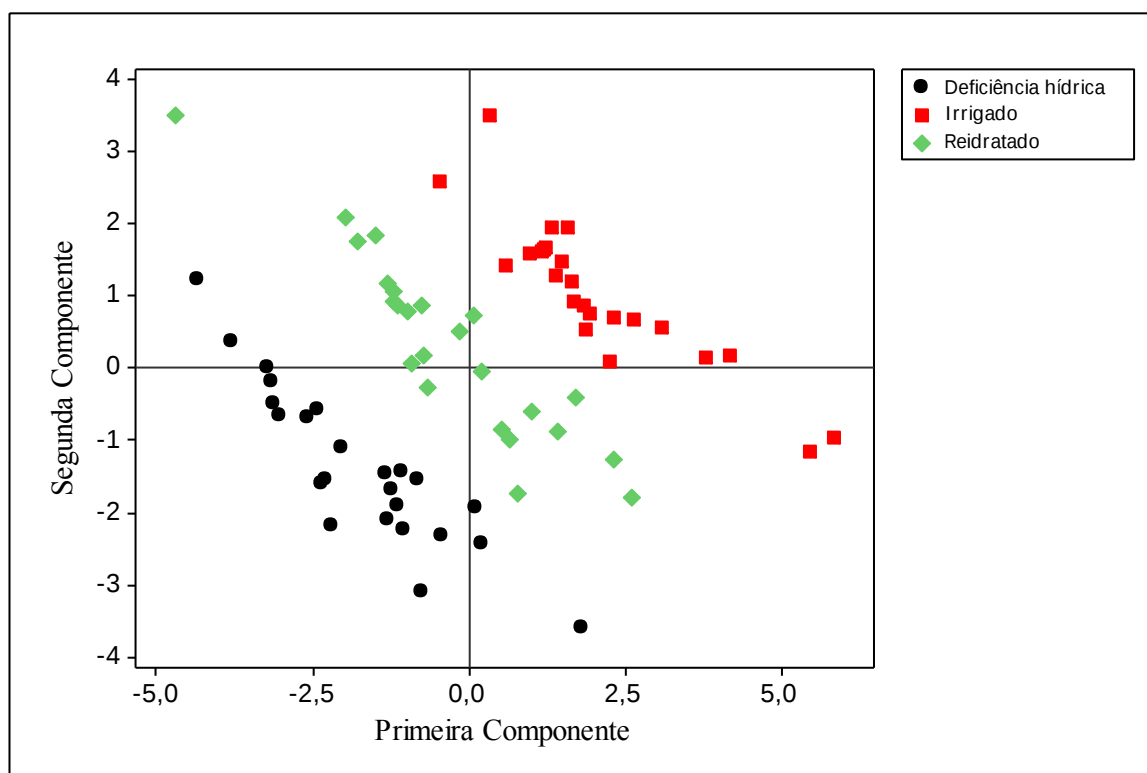


Figura 8. Distribuição das épocas de avaliação, irrigado (antes da imposição da deficiência hídrica), deficiência hídrica (por 30 dias) e reidratação (por 18 dias), de linhagens de cârtamo. Botucatu – SP, 2014.

6.5 Similaridade genética

Entre as medidas de dissimilaridade ou similaridade que podem evidenciar a intensidade de variabilidade genética, a distância Euclidiana e a distância de

Mahalanobis (D^2) são as mais utilizadas por melhoristas em programas de melhoramento genético de plantas. De acordo com Gaur et al. (1978), a análise multivariada pode ser empregada como uma poderosa ferramenta para estimar a dissimilaridade genética, com o intuito de auxiliar na escolha de constituições genéticas que poderão resultar, por meio de suas progênies, em recombinações superiores. Essa técnica, segundo Machado (1999), é a mais eficiente e utilizada na identificação de dissimilaridade genética.

Conforme visto na análise de PCA, as linhagens não recuperaram as características morfofisiológicas após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação, portanto a análise da distância generalizada de Mahalanobis (D^2) foi feita a fim de verificar as linhagens que apresentaram maior similaridade com o tratamento controle, ou seja, as linhagens que melhor recuperaram as características morfofisiológicas após 18 dias de reidratação.

A princípio foram calculadas as matrizes de variâncias e covariâncias residuais de nove caracteres morfofisiológicos de seis linhagens de cártamo, para viabilizar o cálculo da distância de Mahalanobis (D^2) e esquematização da matriz de Mahalanobis (Tabela 27), conforme metodologia descrita por Rao (1952). Pode-se observar que as menores distâncias estão nas linhagens IMA 21, IMA 10 e IMA 04, ou seja, estas linhagens apresentaram melhor recuperação das características morfofisiológicas após 30 dias de deficiência hídrica e 18 dias de reidratação.

A linhagem IMA 02 não apresentou boa recuperação das características morfofisiológicas e, conforme mostrado acima, apresentou maior redução dos componentes de produção (Tabelas 5, 6, 7 e 8).

A linhagem IMA 14 teve maior distância quanto à recuperação após os 18 dias de reidratação (Tabela 27), porém apresentou aumento do número de capítulos por planta (Tabela 6), índice de colheita (Tabela 8), e reduziu pouco em produtividade (Tabela 7), peso de mil grãos (Tabela 9) e massa de matéria seca de parte aérea (Tabela 22) e capítulos (Tabela 23), mostrando boa capacidade de produção mesmo em condições adversas.

Tabela 27. Matriz de similaridade em seis linhagens de cártamo submetidos a tratamento de deficiência hídrica seguido de reidratação (+D) em comparação com o tratamento controle (-D), com base na distância generalizada de Mahalanobis (D^2). Botucatu – SP, 2014.

	1 (-D)	2 (-D)	3 (-D)	4 (-D)	5 (-D)	6 (-D)
1 (+D)	39,392					
2 (+D)		32,678				
3 (+D)			31,103			
4 (+D)				53,203		
5 (+D)					41,336	
6 (+D)						18,099

(1): IMA 02; (2): IMA 04; (3): IMA 10; (4): IMA 14; (5): IMA 16; (6): IMA 21

A linhagem IMA 16 também teve grande distância quanto à recuperação após a reidratação (Tabela 27), de fato, a linhagem não recuperou as características morfofisiológicas avaliadas (Tabelas 6, 8, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, porém mostrou aumento nas variáveis índice de colheita (Tabela 7) e razão raiz/parte aérea (Tabela 25). Apesar da não recuperação das características a linhagem IMA 16 teve a menor taxa de queda de produtividade após o período de estresse (Tabela 9), indicando alta capacidade de produção mesmo após períodos de estresse.

Após a reidratação de uma planta que passou por período de deficiência hídrica, o restabelecimento da abertura estomática leva, pelo menos, alguns dias para regularizar, e reestabelecer a total recuperação do “status” hídrico da planta (PALLAS et al., 1979; TÁVORA; MELO, 1991). Este caráter, no entanto, é governado geneticamente, variando com o potencial de recuperação da cultura.

Segundo Boyer (1976), a rápida capacidade de recuperação é uma característica desejável para a adaptação à seca.

6.6 Caracterização das linhagens de cártamo

A Figura 9 esquematiza a performance das linhagens de cártamo, tanto para as variáveis fisiológicas quanto para as morfológicas, nos regimes hídricos adequado e deficiência hídrica.

Variáveis avaliadas	IMA 02		IMA 04		IMA 10		IMA 14		IMA 16		IMA 21	
	-D	+D	-D	+D	-D	+D	-D	+D	-D	+D	-D	+D
NC	Verde	Vermelho	Vermelho	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Vermelho	Amarelo	Amarelo	Amarelo
IC	Verde	Vermelho	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Verde	Verde	Vermelho
PMG	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo
PROD	Vermelho	Vermelho	Amarelo	Amarelo	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho
TRA	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho
Ψ_w	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde
SPAD	Amarelo	Vermelho	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Vermelho	Verde	Vermelho	Vermelho	Amarelo	Amarelo
EE	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Verde	Verde	Amarelo	Vermelho	Verde	Amarelo	Amarelo
Cl <i>a</i>	Vermelho	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Vermelho	Vermelho	Amarelo	Amarelo
Cl <i>b</i>	Vermelho	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Verde	Amarelo	Vermelho	Verde	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho
Cl <i>t</i>	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Vermelho	Verde	Vermelho
Carot	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho
AP	Vermelho	Verde	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho
MMSPA	Vermelho	Amarelo	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Vermelho
MMSR	Vermelho	Amarelo	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo
MMSC	Amarelo	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo
R/PA	Verde	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde

Figura 9. Quadro comparativo linhagens de cârtamo x regime hídrico adequado (-D) e deficiência hídrica (+D) para as variáveis: número de capítulos por planta (NC), índice de colheita (IC), peso de mil grãos (PMG), produtividade (PROD), teor relativo de água na folha (TRA), potencial de água na folha (Ψ_w), índice SPAD, extravasamento de eletrólitos (EE), clorofila *a* (Cl *a*), clorofila *b* (Cl *b*), clorofilas *totais* (Cl *t*), carotenoides (Carot), altura de planta (AP), massa de matéria seca de parte aérea (MMSPA), massa de matéria seca de raízes (MMSR), massa de matéria seca de capítulos (MMSC) e razão raiz/parte aérea (R/PA). A cor verde representa variável pouco afetada, a cor amarela representa variável moderadamente afetada e a cor vermelha representa variável muito afetada pela deficiência hídrica.

7 CONCLUSÃO

As linhagens responderam de maneira diferente ao estresse por deficiência hídrica, indicando alta variabilidade genética entre elas.

As variáveis fisiológicas índice SPAD, extravasamento de eletrólitos, conteúdo de clorofila *a*, conteúdo de clorofilas *totais* e carotenoides se destacaram na diferenciação das linhagens durante a deficiência hídrica e reidratação.

A linhagem IMA 14 foi menos afetada em sua fisiologia e morfologia pela deficiência hídrica.

A linhagem IMA 16 foi bem mais afetada em sua fisiologia pela deficiência hídrica.

As linhagens IMA 02, IMA 04, IMA 10 E IMA 21 foram moderadamente afetadas tanto na fisiologia quanto na morfologia pela deficiência hídrica.

O período de 18 dias de reidratação não foi suficiente para total recuperação das variáveis morfofisiológicas das linhagens.

Sob regime hídrico ideal, a linhagem IMA 21 é mais produtiva, seguida das linhagens IMA 16, IMA 10 e IMA 04.

Sob regime de deficiência hídrica, a linhagem mais produtiva é a linhagem IMA 16, seguida das linhagens IMA 14 e IMA 04.

8 REFERÊNCIAS

- AMBROSANO, L.; **Avaliação de plantas oleaginosas potenciais para cultivo de safrinha**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- AMINI, H.; ARZANI, A.; BAHARAMI, F. Seed yield and same physiological traits of safflower as affected by water deficit stress. **International Journal of Plant Production**. 2014.
- ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico**. Piracicaba: Ed. do Autor, 2002. 272 p.
- ARAÚJO, S.A.C.; DEMINICIS, B.B. Fotoinibição da Fotossíntese. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 7, n. 4, p. 463-472, 2009.
- ASHRI, A.; KNOWLES, P. F. Cytogenetics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) species and their hybrids. **Agronomy Journal**, v. 52, n. 1, p. 11-17, 1960.
- ASHRAFI E.; RAZMJOO K. Effect of irrigation regimes on oil content and composition of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 87, p. 499-506, 2010.
- ATHAR, H.; ASHRAF, M. **Photosynthesis under drought stress**. In: Pessarakli, 2005.

BAGHERI, B; SAM-DAILIRI, M. Effect of water estress on agronomic traits of safflower spring (*Carthamus tinctorius*). **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 12, p. 2621-2624, 2011.

BAJJI, M.; KINET, J. M.; LUTTS, S. The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat, **Plant Growth Regulation**, p. 1-10, 2001.

BANNAYAN, M.; NADJAFI, F.; AZIZI, M.; TABRIZI, L.; RASTGOO, M. Yield and seed quality of *Plantago ovata* and *Nigella sativa* under different irrigation treatments. **Industrial Crops and Products**, v. 27, p. 11-16, 2008.

BARROS JÚNIOR, G.; GUERRA, H. O. C.; CAVALCANTI, M. L. F.; LACERDA, R. D; OLIVEIRA, J. M. C. Efeito do déficit de água no solo sobre a relação raiz/parte aérea nas linhagens de mamona BRS 149 e BRS 188. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA**, 2., 2006, Aracaju-SE. Resumos. Aracaju-SE, 2006.

BAYYAVAS et al. Determination of seed yield and yield components of some safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars, lines and populations under the Semi-Arid conditions. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 4, p 527-534, 2011.

BERGONCI, J. I. et al. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 8, p. 1531-1540, 2000.

BLUM, A. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. In: **BELHASSEN, E. (Ed.). Drought tolerance in higher plants: genetical, physiological, and molecular biological analysis**. Dordrencht: Kluwer Academic Publishers, 1997. p. 57-70.

BRASIL. Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DND/CLAV, 1992. 365p.

BONFIM-SILVA, E. M.; ANICÉSIO, E.C.A.; OLIVEIRA, J. R.; SOUSA, H. H. F.; SILVA, T. J. A. Soil water availabilities in the content and accumulation of nitrogen and chlorophyll index in the safflower. **American Journal of Plant Sciences**. v. 6, p. 2280-2286, 2015.

BOWLES V. G.; MAYERHOFER R.; DAVIS C.; GOOD A. G.; HALL J. C. A phylogenetic investigation of *Carthamus* combining sequence and microsatellite data. **Plant Systematics and Evolution**, v. 287, p. 85-97, 2010.

BOYER, J. S. Water deficts and photosynthesis. In: KOZLOWSKI, T. T.(Ed). **Water deficit and plant growth**. New York: Academic, v. 4, p. 153-190, 1976.

BUENO, L. C. S.; MENDES, A. N. G.; CARVALHO, S. P. **Melhoramento de plantas: princípios e procedimentos**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 319 p.

CAIRO, P. A. R. **Curso básico de relações hídricas de plantas**. Vitória da Conquista: UESB, 1995. 32 p.

CAMAS, N.; CIRAK, C.; ESENDAL, E.. Seed yield, oil content and fatty acids composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown in northern Turkey conditions. University of Ondokuz Mayıs. **Journal of the Faculty of Agriculture**, v. 22, n. 1, p. 98-104, 2007.

CANAVAR, O.; GOTZ, K. P.; KOCA, Y. O.; ELLMER, F. relationship between water use efficiency and $\delta^{13}C$ isotope discrimination of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress. **Turkish Journal of Field Crops**, v. 19, n. 2, p. 212 – 220, 2014.

CARTER, G. A.; MCCAIN D. C. Relationship of leaf spectral reflectance to chloroplast water content determined using NMR microscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 46, p. 305-310, 1993.

CARVALHO, M. **Variações morfofisiológicas e eficiência do uso da água em ricinus communis L. submetida ao déficit hídrico regulado**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Produção Vegetal)-Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brasil – UESC, 2010.

CAVATTE, P. C. A fisiologia dos estresses abióticos. In: FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011. p. 39-79.

CHANDRASEKAR, V.; SAIRAM, R. K.; SRIVASTAVA, G. C. Physiological and biochemical responses of hexaploid and tetraploid wheat to drought stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 185, p. 219-227, 2000.

CHAVES, J. C. D; CALEGARI, A. Adubação verde e rotação de culturas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 189, p. 53-60, 2001.

COLOM, M. R.; VAZZANA, C. Photosynthesis and PSII functionality of drought-resistant and drought sensitive weeping lovegrass plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 49, n. 2, p. 135-144, 2003.

CORONADO, L. M. **El cultivo del cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) em México**. Cuidade Obregon-México: SGI. 2010, 96p.

COSCOLIN, R. B. S. **Efeitos fisiológicos e bioquímicos induzidos por deficiência hídrica em plantas de *Ocimum basilicum* L.** 2012. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Irrigação e Drenagem)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

COSTA, M. A. **Ocorrência de danos celulares e capacidade de defesa antioxidante em mudas de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) sob duas condições de déficit hídrico e após reidratação**. 2009. 36 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal Rural da Amazônia, 2009.

COUTO, L.; COSTA, E. F.; VIANA, R. T. Avaliação e comportamento de linhagens de milho em diferentes condições de disponibilidade de água no solo. **Relatório técnico**

anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo: 1980-1984. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA-CNPMS, 1986, p.77-78.

CONAB – **COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO.** Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Safra 2013/14. <
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_06_10_12_12_37_boletim_graos_junho_2014.pdf> Acesso em: 11 jun. 2014.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético.** 2. ed. Vicosa: UFV, 2006. 585 p.

DAJUE, L; MÜNDEL, H. H. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crop. **IPGRI: International Plant Genetic Resource Institute.** Rome, 1996. 81p.

DECOV, I.; TSONEV, T.; YORDANOV, I. Effects of water stress and high temperature stress on the structure and activity of photosynthetic apparatus of *Zea mays* and *Helianthus annuus*. **Photosynthetica**, v. 38, p. 361-366, 2000.

DONALD, C. M.; HAMBLIN, J. The biological yield and harvest index of cereal as agronomic and plant breeding criteria. **Advances in Agronomy**, v. 28, p. 361-405, 1976.

DORDAS A. C., SIOULAS C. Safflower yield, chlorophyll content, photosynthesis, and water use efficiency response to nitrogen fertilization under rainfed conditions. **Industrial Crops and Products**, v. 27, p. 75-85, 2008.

EFEUGLU, B. et al. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. **South African Journal of Botany**, v. 75, p. 34-42, 2009.

EMBRAPA. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação e Solos.** Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA MEIO NORTE – **EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.** Cultivo do Feijão-caupi. 2003. Disponível em
<<http://www.cpamn.embrapa.br>> Acesso em: 11 jun. 2014.

EMONGOR, V. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) the underutilized and neglected crop: A review. **Asian Journal of Plant Science**, v. 9, n. 6, p. 299-306, 2010.

ESENDAL, E. A research on the phenological and morphological traits, and yields and seed properties of some domestic and foreign (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars grown under Erzurum ecological conditions. **Atatürk University Publishing**, Erzurum, 1973.

ESLAM, B. P. Evaluation of physiological indices for improving water deficit tolerance in spring safflower. **Journal of Agriculture Science and Technology**, v. 13, n. 3, p. 327-338, 2011.

ESTEVES, A.; PEREIRA, E. B. C.; RUSCHEL, R. **Avaliação de características agrônômicas em linhagens de milho (*Zea mays*) introduzidas, na semeadura de**

“safrinha”. In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 20., Goiânia, 1994. Centro-Oeste: cinturão de milho e sorgo no Brasil; Resumos. Goiânia: ABMS, EMGOPA, EMBRAPA, CNPMS, UFG, EMATER-GO, 1994. P.36.

FARIA, G. F. A. F. **Avaliação da germinação e mecanismos de tolerância à seca de duas oleaginosas perenes sob déficit hídrico**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

FAO/STAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics**. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>>, Acessado em 01/06/2015.

FRITSCHÉ-NETO, R.; DOVALE, J. C.; CAVATTE, P. C. Melhoramento para tolerância a estresses ou para eficiência no uso de recursos? In: FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Visconde de Rio Branco: Suprema, 2011. p. 29-38.

GAUR, P. C.; GRUPTA, P. K.; KISHORI, H. Studies on genetic divergence in potato. **Euphytica**, Wageningen, v. 27, p. 316-368, 1978.

GAZOLLA, A.; BORTOLINI, E.; PRIMIANO, I. V.; CUNHA, D. A. Estudo do ambiente de produção do girassol. In: CÂMARA, G. M. S. (Coord.). **A Cultura do Girassol**. Trabalho didático como parte das exigências da disciplina Plantas Oleaginosas, do curso de graduação em Engenharia Agrônoma. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba. 2011.

GERHARDT, I. F. S.; **Divergência genética entre acessos de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.)**. 2014. 43 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Botucatu, 2014.

GERONIMO, G. Z. **Características morfológicas e agrupamento genético de cana-de-açúcar sob deficiência hídrica**. 2014. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

GIAYETTO, O. et al. Comportamento de linhagens de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) en la region de Rio Cuarto, Cordoba (Argentina). **Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales**, v. 14, n 1-2, p 203-215, 1999.

GONÇALVES, J. F. de C.; SILVA, C. E. M. da; GUIMARÃES, D. G. Fotossíntese e potencial hídrico foliar de plantas jovens de andiroba submetidas à deficiência hídrica e à reidratação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 8-14, 2009.

GORAI, M.; HACHEF A.; NEFFATI, M. Differential responses in growth and water relationship of *Medicago sativa* (L.) cv. Gabès and *Astragalus gombiformis* (Pom.) under water-limited conditions. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, n. 22, v. 1, p. 01-12, 2010.

GOULD, K. S.; MCKELVIE, J.; MARKHEM, K. R. Do anthocyanins function as antioxidants in leaves? Imaging of H₂O₂ in red and green leaves after mechanical injury. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 1261-1269, 2002.

GRACIA et al. **Guia para produzir cártamo em Sinaloa**. Fundación Produce, Sinaloa México, 2010, 22p.

GUIMARÃES, A. C. R. **Caracterização de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas a déficit hídrico**. 2011. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011.

HAJGHANI, M.; SAFFARI, M.; MAGHSOUDI MOUD, A. A. Path coefficient analysis for the yield components of spring safflower cultivars (*Carthamus tinctorius* L.) in Iran under different nitrogen levels. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, v. 6, n. 6, p. 737-740, 2009.

HOJATI, M.; MODARRES-SANAVY, S. A. M.; KARIMI, M.; GHANATI, F. Responses of growth and antioxidant systems in *Carthamus tinctorius* L. under water deficit stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 33, p. 105-112, 2011.

HSIAO, T. C. Measurements of plant water status. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Eds.). **Irrigation of Agricultural crops**. New York: American society of Agronomy, 1990. cap. 9, p. 244-280.

HSIAO, T. C. Plant Responses to Water Stress. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 24, n. 1, p. 519-570, 1973.

IBRAHIM, A. F., SHARAAN, A. N., EL-WAKIL, A. W. Water requirements of safflower entries in middle Egypt. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 3, p. 70-175, 1991.

ISTANBULLUOGLU, A. Effects of irrigation regimes on yield and water productivity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under Mediterranean climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1792-1798, 2009.

ISTANBULLUOGLU, A.; GOCMEN, E.; GEZER, E.; PASA, C.; KONUKCU, F. Effects of water stress at different development stages on yield and water productivity of winter and summer safflower (*Carthamus tinctorius* L.). **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1429-1434, 2009.

JABBARI, M.; EBADI, A.; TOBEH, A.; MOSTAFAILI, H. Effects of supplemental irrigation on yield and yield components of spring safflower genotypes. **Recent Research in Science and Technology**, v. 2, n. 1, p. 23-28, 2010.

JALEEL, C. A. et al. Alterations in morphological parameters and photosynthetic pigment responses of *Catharanthus roseus* under soil water deficits. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 61, p. 298-303, 2008.

JAMAUX, I.; STEINMETZ, A.; BELHASSEN, E. Looking for molecular and physiological markers of osmotic adjustment in sunflower. **New Phytologist**, v. 137, p. 117-127, 1997.

- JOEL, G.; GAMON, J. A.; FIELD, C. B. Production efficiency in sunflower: The role of water and nitrogen stress. **Remote Sensing of Environment**, n. 62, p. 176-188, 1997.
- JONES, H. G.; CORLETT, J. E. Current topics in drought physiology. **Journal of Agricultural Science**, v. 119, p. 291-296, 1992.
- JUNG, S.; KIM, J. S.; CHO, K. Y. TAE, G. S. KANG, B. G. Antioxidant responses of cucumber (*Cucumis sativus*) to photoinhibition and oxidative stress induced by norflurazon under high and low PPFDs. **Plant Science**, v. 153, p. 145-154, 2000.
- KANG, S. Z.; SHI, W.; ZHANG, J. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. **Field Crops Research**, v. 67, p. 207-214, 2000.
- KER, G.; KUMAR, A.; MARTHA, M. Water use efficiency and crop coefficients of dry season oilseed crops. **Agricultural Water Management**, v. 87, p. 73-82, 2007.
- KIZIL et al. Comprehensive study on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in semi-arid conditions. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, v. 4, n. 1, p. 947-953, 2008.
- KOSE, A. Research on yield and quality characteristics of some safflower (*Carthamus tinctorius* L.) lines and varieties under dry and irrigated conditions in Turkey. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 11, n. 1, p. 553-556, 2013.
- KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic Press, 1995. 495 p.
- KRIEDEMANN, P. E., DOWNTON, W. J. S. Photosynthesis. – In: **Paleg, L.G., Aspinall, D.** (ed.): *The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants*. p. 283-314. Academic Press, Sydney – New York – London – Toronto – San Francisco 1981.
- KRIEG, D. R. Stress tolerance mechanisms in above ground organs. In: **Proceedings of the Workshop on Adaptation of Plants to Soil Stress**. Intormil, Nebraska. p. 65-79, 1993.
- KNOWLES, P. F. Safflower. In: ROBBELEN, G.; DOWNEY, R.K.; ASRHI, A. (Eds), **Oil Crops of the World**, McGraw Hill, New York, p. 363-374, 1989.
- KYPARISSIS, A.; PETROPOULOU, Y.; MANETAS, Y. Summer survival of leaves in a soft-leaved shrub (*Phlomis fruticosa* L., Labiatae) under Mediterranean field conditions: avoidance of photoinhibitory damage through decreased chlorophyll contents. **Journal of Experimental Botany**, v. 46, p. 1825-1831, 1995.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Sao Carlos: RIMA, 2006. 531 p.
- LAWLOR, D. W.; UPRETY, D. C. Effects of water stress on photosynthesis of crops and the biochemical mechanism. In: Abrol YP, Mohanty P, Govinjee, eds. *Photosynthesis: photoreactions to plant productivity*. **Oxford and IBH Publishing Co. PVT. Ltda**, v. 1, p. 419-449, 1993.

LEE J. Y.; CHANG E.J.; KIM H.J.; PARK J.H.; CHOI S.W. Antioxidative flavonoids from leaves of *Carthamus tinctorius*. **Archives of Pharmacal Research**, v. 25, p. 313-319, 2002.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophyll and carotenoids, the pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods Enzymology**, v. 148, p. 331-382, 1987.

LI, L.; VAN STADEN, J. Effects of plant growth regulators on the antioxidant system in callus of two maize cultivars subjected to water stress. **Plant Growth Regulation**, v. 24, p. 55-66, 1998 a.

LI, L., VAN STADEN, J. Effects of plant growth regulators on drought resistance of two maize cultivars. **South African Journal of Botany**, v. 64, p. 116-120, 1998 b.

LOVELLI, S. et al. Yield response factor to water (Ky) and water use efficiency of *Carthamus tinctorius* L. and *Solanum melongena* L. **Agricultural Water Management**, v. 92, p. 73-80, 2007.

MACHADO, C. F. **Procedimentos para a escolha de genitores de feijão**. 1999. 118 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

MAHALANOBIS, P. C. On the generalized distance statistic. **Proceedings of the National Institute**, v. 2, n. 1, p. 9-55, 1936.

MOREIRA, T., HENRIQUES, F. S., MATOS, M. C., CAMPOS, P. S.: Protoplasmatic drought resistance and water use efficiency. – **Bulletin de la Société Botanique de France**, v. 137, p. 81-89, 1990.

MOVAHHEDY-DEHNAVY, M.; MODARRES-SANAVY, S. A. M.; MOKHTASSI-BIDGOLI, A. Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit stress. **Industrial Crops and Products**, v. 30, p. 82-92, 2009.

MÜNDEL, H. H.; HUANG, H. C.; KOZUB, G. C.; BARR, D. J. S. Effect of soil moisture and temperature on seedling emergence and incidence of *Pythium* damping-off in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). **Canadian Journal of Plant Science**, v. 75, p. 505-509, 1995.

NAMIREMBE, S.; BROOK, R. M.; ONG, C. K. Manipulating phenology and water relations in *Senna spectabilis* in water limited environment in Kenya. **Agroforestry Systems**, v. 75, p. 197–210, 2008.

NAYYAR, H.; GUPTA, D. Differential sensitivity of C3 and C4 plants to water deficit stress: association with oxidative stress and antioxidants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 58, p. 106-113, 2006.

NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Tolerância à seca em plantas: Mecanismos fisiológicos e moleculares. **Revista Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, n. 23, p. 12-18, 2001.

NOGALA-KALUCKA, M.; RUDZINSKA, M.; ZADERNOWSKI, R.; SIGER, A.; KRZYZOSTANIAK, I. Phytochemical content and antioxidant properties of deeds of unconventional oil Plants. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 87, p. 1481-1487, 2010.

NOGUEIRA, R. J. M. C. ; MORAES, J. A. P. V.; BURITY, H. A. Curso diário e sazonal das trocas gasosas e do potencial hídrico foliar em aceroleiras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 7, p. 1331-1342, 2000.

NOGUEIRA, R. J. M. C. et al. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, p. 75-87, 2001.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; ALBUQUERQUE, M. B.; SILVA, E. C. Aspectos ecofisiológicos da tolerância à seca em plantas de caatinga. In: NOGUEIRA, R. J. M. C.; ARAÚJO, E. L.; WILLADINO, L. G.; CAVALCANTE, U. M. T. (Orgs.). **Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas**. 1 ed. Recife: Imprensa Universitária da UFRPE, 2005, v. 1, p. 22-31.

OGNONNAYA, C. I. et al. Selection of cowpea genotypes in hydroponics, pots, and field for drought tolerance. **Crop Science**, v. 43, p. 1114-1120, 2003.

O'NEILL, P. M.; SHANAHAN, J. F.; SCHEPERS, J. S. Use of chlorophyll fluorescence assessments to differentiate corn hybrid response to variable water conditions. **Crop Science**, v. 46, p. 681-687, 2006.

OREN, R.; SPERRY, J. S.; KATUL, G. G.; PATAKI, D. E.; EWERS, B. E.; PHILLIPS, N.; SCHAFER, K. V. R. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. **Plant, Cell and Environment**, v. 22, n. 12, p. 1515-1526, 1999.

OSAKI, M.; BATALHA, M. O. Produção de biodiesel e óleo vegetal no Brasil: realidade e desafio. In: XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural - SOBER, v. 46, 2008. Rio Branco. **Anais**. Rio Branco: SOBER, 2008.

OZEL, A.; DEMIRBILEK, T.; COPUR, O.; GUR, M. A. The effect of different sowing date and intra-row spacing on petal yield and some agronomic characters of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under the Harran plain arid condition, **Journal of the Faculty of Agriculture**, v. 8, p. 1-7, 2004.

OZTURK, E.; OZER, H.; POLAT, T. Growth and yield of safflower genotypes grown under irrigated and non-irrigated conditions in a highland environment. **Plant Soil Environment**, v. 54, p. 453-460, 2008.

PALLAS, J. E.; STANSELL, J. R; KOSKE, T. J. Effects of drought on florunner peanuts. **Agronomy Journal**, v. 71, p. 853-858, 1979.

PEIXOTO, C. P. **Análise de crescimento e rendimento de três linhagens de soja em três épocas de semeadura e três densidades de plantas**. 1998. 151 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1998.

PEIXOTO, C. P.; CERQUEIRA, E. C.; SOARES FILHO, W. S.; CASTRO NETO, M. T.; LEDO, C. A. S.; MATOS, F. S.; OLIVEIRA, J. G. Análise de crescimento de diferentes genótipos de citros cultivados sob déficit hídrico. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 28, n. 3, p. 439-443, 2006.

PEIXOTO, C. P.; PEIXOTO, M. F. S. P. Dinâmica do crescimento vegetal: princípios básicos. In: CARVALHO, C. A. L. et al. (Coord.). **Tópico em ciências agrárias**. Bahia, 2009, v. 1, cap. 4, p. 37-38.

PIETRINI, F.; IANNELLI, M. A.; MASSACI, A. Anthocyanin accumulation in the illuminated surface of maize leaves enhances protection from photo-inhibitory risks at low temperature, without further limitation to photosynthesis. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 1251-1259, 2002.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: EDUR, 2004. 191 p.

PIMENTEL, C.; PEREZ, A. J. Estabelecimento de parâmetros para avaliação de tolerância à seca, em genótipos de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 1, p. 31-39, 2000.

PINCELLI, R. P. **Tolerância à deficiência hídrica em linhagens de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas**. 2010. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

QUAGGIO, J. A.; UNGARO, M. R. G. Girassol. **Boletim Técnico IAC**, Campinas, n. 100, p. 198, 1997, 2 ed. rev. atual.

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy & Crop Science**, v. 185, p. 83-89, 2000.

RAO, C. M.; KUMAR, M. V.; REDDY, L. K. Management of sugarcane clones under limited moisture situations (drought) at formative stage. **Indian Sugar**, p. 949- 953, 2005.

ROCHA, E. K. **Fenologia e qualidade de *Carthamus tinctorius* L. em diferentes populações e épocas de cultivo**. 72 f. 2005. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

ROZA, F. A. **Trocas gasosas foliares e crescimento de *Jatropha curcas* L. na fase reprodutiva sob estresse hídrico**. 2010. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brasil – UESC, 2010.

- RUBIS, D. D. Development of a root rot resistance in safflower by introgressive hybridization and thin-hull facilitated recurrent selection. In: **Proceedings First International Safflower Conference**, Davis, California, EUA, 1981.
- SASSAKI, R. M.; MACHADO, E. C. Trocas gasosas e condutância estomática em duas espécies de trigo em diferentes teores de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 9, p. 1571-1579, 1999.
- SÁ BRAZ, M. R.; ROSSETTO, C. A. V. Crescimento de plantas de girassol em função do vigor de aquênios e da densidade de semeadura. **Ciência Rural**, v. 39, n. 7, p. 1989-1996, 2009.
- SALEM, N.; MSAADA, K.; DHIFI, W.; SRITI, J.; MEJRI, H.; LIMAN, F.; MARKOUK, B. Effect of drought on safflower natural dyes and their biological activities. **International Online Journal for Advances in Sciences**, v. 13, p. 1-18, 2013.
- SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.
- SCARASCIA-MUGNOZZA, G.; DE ANGELIS, P.; MATTEUCCI, G.; VALENTINI, R. Long-term exposure to elevated [CO₂] in a natural *Quercus ilex* L. community: net photosynthesis and photochemical efficiency of PSII at different levels of water stress. **Plant, Cell and Environment**, v. 19, p. 643-654, 1996.
- SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 30, p. 507-512, 1974.
- SCOTTI CAMPOS, P.; THU PHAM THI, A. Effect of abscisic acid pretreatment on membrane leakage and lipid composition of *Vigna unguiculata* leaf discs subjected to osmotic stress. **Plant Science**, v. 130, p. 11-18, 1997.
- SCHOLANDER, P. F.; J HAMMEL, H.; HEMMINGSEN, E. A.; BRADSTREET, E. D. Sap pressure in vascular plants. **Science**, v. 148, p. 339-46, 1965.
- SEHGAL D.; RAINA S. N.; DEVARUMATHA, R. M.; SASANUMA, T.; SASAKUMA, T. Nuclear DNA assay in solving issues related to ancestry of the domesticated diploid safflower (*Carthamus tinctorius* L.) and the polyploid (*Carthamus*) taxa, and phylogenetic and genomic relationships in the genus *Carthamus* L. (Asteraceae). **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 53, p. 631-644, 2009.
- SHAFIR-UR-REHMAN; HARRIS, P. J. C.; ASHRAF, M. Stress environments and their impact on crop production. In: ASHRAF, M.; HARRIS, P. J. C. 2005. **Abiotic stress: plant resistance through breeding and molecular approaches**. New York: Food Products Press. 725 p.
- SCHLEMMER, M.R. et al. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 106-112, 2005.

SHERWIN, H. W.; FARRANT, J. M. Protection mechanisms against excess light in the resurrection plants *Craterostigma wilmsii* and *Xerophyta viscosa*. **Plant Growth Regulation**, v. 24, p. 203-210, 1998.

SIDDIQUE, M.R.B; HAMID, A.; ISLAM, M.S. Drought stress effects on water relations of wheat. **Botanical Bulletin of Academia Sinica**, v. 41, p. 35-39, 2000.

SILVA, V. **Caracterização fisiológica da tolerância à seca em *Coffea canephora*: contribuição relativa do sistema radicular e da parte aérea**. 2007. 57 f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2007.

SILVA, E. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; AZEVEDO-NETO, A. D.; SANTOS, V. F. Comportamento estomático e potencial da água da folha em três espécies lenhosas cultivadas sob estresse hídrico. **Acta Botanica Brasilica** v. 17, n. 2, p. 231-246, 2003.

SILVA, C. J. et al. Avaliação do desempenho produtivo de acessos de cártamo sob condições de safrinha. In: Congresso Brasileiro de Mamona, 5 ; Simpósio Internacional de Oleaginosas energéticas, 2 & I Fórum Capixaba de Pinhão Mando, 2012, Guarapari. Desafios e Oportunidades: **Anais...** Campina grande: Embrapa Algodão, 2012. p. 353.

SILVA, C. J.; **Caracterização agronômica e divergência genética de acessos de cártamo**. 2013. 51 f. Tese (Doutorado em Agricultura)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Botucatu, 2013.

SMITH, J. R. Safflower. **AOCS Press**, Champaign, IL, USA. 624 p. 1996.

STEER, B. T.; HARRIGAN, E. K. S. Rates of nitrogen supply during different developmental stages affect yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). **Field Crops Research**, v. 14, p. 221-231, 1986.

SOARES, F. C.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; PARIZI, A. R. C.; RAMÃO, C. J.; VIVAN, G. A. Resposta da produtividade de híbridos de milho cultivado em diferentes estratégias de irrigação. **Irriga**, v. 15, n. 1, p. 36-50, 2010.

SUBBARAO, G. V.; JOHANSEN, A.C.; SLINKARD, R.C.; RAO, N.; SAXENA, N.P.; CHAUHAN, Y.S. Strategies for improving drought resistance in grain legumes. **Critical Review in Plant Science**, v. 14, p. 469-529, 1995.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TÁVORA, F. J. A. F.; MELO, F. I. Respostas de linhagens de amendoim a ciclos de deficiência hídrica: Crescimento vegetativo, reprodutivo e relações hídricas. **Ciência Agrônômica**, v. 22, n. 1/2, p. 47-60, 1991.

TEIXEIRA, D. L. et al. Caracterização agronômica de amaranto para cultivo na entressafra no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 1, p. 45-51, jan. 2003.

VIVAS, M. J. Culturas Alternativas – Cártamo, Sésamo e Camelina. **Melhoramento**, 38: 183-192. 2002.

WAHID, A. Physiological implications of metabolite biosynthesis for net assimilation and heat-stress tolerance of sugarcane (*Saccharum officinarum*) sprouts. **Journal of Plant Research**, v. 120, n. 2, p. 219-228, 2007.

WANDERLEY, J.A.C. **Morfofisiologia e produção do girassol sob técnicas de captação de água “in situ” e adubação orgânica**. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado Irrigação e Drenagem)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Paraíba, 2013.

WEISS, E. A. **Safflower**. In: Oilseed Crops, Editora Blackwell, 2000, p. 129.

YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant responses to drought and stress tolerance. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, v. 1, p. 187-206, 2003.

YOUNG, A. J. The protective role of carotenoids in higher plants. **Physiologia Plantarum**, v. 83, p. 702-708, 1991.

ZARCO-TEJADA, P. J. et al. Leaf Chlorophyll *a+b* and canopy LAI estimation in crops using R-T models and Hyperspectral Reflectance Imagery. In: CONGRESS OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR AGRONOMY, 7., 2002. **Proceedings...**, 2002.

ZHANG, H.; SUI, X.; LI, B. J.; ZHHOU, D. An improved water-use efficiency for winter wheat grown under reduced irrigation. **Field Crops Research**, v. 59, p. 91-98, 1998.

ZOZ, T.; **Correlação e análise de trilha de produtividade de grãos e seus componentes e caracteres de planta em cártamo (*Carthamus tinctorius* L) e mamona (*Ricinus communis* L.)**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura)- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Botucatu, 2012.