**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Influência da irrigação e da adubação nitrogenada na produção e qualidade
do óleo das sementes de pinhão-mansó**

Irineu Pedro de Sousa Andrade

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

**Piracicaba
2016**

Irineu Pedro de Sousa Andrade
Engenheiro Agrônomo

Influência da irrigação e da adubação nitrogenada na produção e qualidade do óleo das sementes de pinhão-manso

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Andrade, Irineu Pedro de Sousa

Influência da irrigação e da adubação nitrogenada na produção e qualidade do óleo das sementes de pinhão-mansão / Irineu Pedro de Sousa Andrade. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.
158 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Jatropha curcas* L. 2. Manejo hídrico 3. Fertilização mineral 4. Biocombustíveis
I. Título

CDD 633.85
A553i

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Dedico,

Aos meus pais Pedro Miguel de Andrade e Antonia Maria de Souza Conrado

À minha irmã Camila Souza de Andrade

À minha namorada Natiele Moura Ferreira

*À DEUS, meu guia
e consolador,
companheiro de
todos os
momentos.*

Ofereço

AGRADECIMENTOS

À Deus, por toda a saúde, determinação e sabedoria que tem me concedido até então, a companhia sublime do Sagrado Coração de Jesus na minha vida nesses últimos anos aliado com a intercessão da sempre Virgem Maria. A Tua Graça me basta!

Aos meus pais Pedro Miguel e Antonia Maria por toda educação, amor e carinho que vocês tem me dado. Este trabalho também é fruto de vocês. A minha querida irmã Camila, que com o seu exemplo de luta e perseverança me inspirou e muito nesses anos de Doutorado, e a todos os meus familiares que sempre me apoiaram e torceram por mim nesta etapa.

À minha amada Natiele Moura Ferreira, pela sua companhia nesses anos de namoro e por todo o seu amor e compreensão nos momentos em que passamos juntos (mesmo à distância). Agradeço também à todos os seus familiares que sempre me acolheram bem nas minhas idas a Petrópolis, em especial a Marcos Benedito, Sandra Cristina, João Pedro, Marcos Paulo e Vanessa Faustino.

À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz por toda a infraestrutura e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela oportunidade de realização do curso de doutorado, onde estendo minha gratidão aos professores pelo conhecimento compartilhado.

Ao professor Marcos Vinícius Folegatti, meu orientador, pela confiança depositada desde o início e pela sua atenção constante, sinceridade, amizade, e por todas as suas valiosas orientações sejam no meio profissional-científico ou na esfera humana. Sinto-me honrado por ter feito parte da sua equipe.

As professoras Dra. Patrícia Angélica Alves Marques e Dra. Thaís Maria Ferreira de Souza Vieira por todo apoio e auxílio no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores Dr. Leonardo Duarte Batista da Silva, Dr. Felipe Gustavo Pilau e Dr. Fabio Ricardo Marin por suas sugestões e opiniões no exame de qualificação, para a melhoria e engrandecimento dessa pesquisa, em especial ao Dr. Leonardo pelo apoio e amizade em todos os momentos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, Gilmar Batista Grigolon, Paula Alessandra Bonassa, Antônio Agostinho Gozzo (Seu Antônio), Ângela Márcia Derigi Silva, Davilmar Aparecida Colevatti, Hélio de Toledo Gomes, Luiz Custódio Camargo e Paula Leme Mendes, pela atenção e disposição durante a realização dos trabalhos.

Aos meus amigos membros do grupo de pesquisa com quem compartilhei conhecimentos e experiências: João Paulo, Bruno Lena, Adriano Diotto, Cícero Renê, Eder

Fanaya Jr., Otávio Neto e Jefferson José, obrigado pelos momentos de companhia, dentro e fora da área experimental e da Esalq. Este trabalho tem a colaboração concreta de cada um e também é de vocês.

Aos meus amigos de pós graduação, Hermes da Rocha, Kaline de Melo, Marco Bragaia, Osvaldo Neto, José Leôncio, Conan Salvador, Marinaldo Pinto, Dinara Alves, Marcos Amaral, Daniel Leal, Wagner Woff, Eusímio Fraga, Fernando Barbosa, Lucas da Costa Santos, Rony Sampaio, Rogério Lavanholi, Jéfferson Costa, Ana Paula Damasceno, Fabrício de Oliveira, Luís Carvalho, Roberto Marano, Timóteo Herculino, Thiago Villa, Acácio Perboni, Nathalia, Alejandra, Asdrúbal, Luiz Sobenko, pelo bom convívio.

Aos professores do departamento do ciências exatas, Dr. Carlos Tadeu e Dra. Renata Alcarde, e aos recém doutores, Dra. Adriele Biase e ao meu amigo Dr. Fredy Aguillar por todo auxílio estatístico que necessitei e pelos esclarecimentos e atenção recebida por todos.

Aos meus grandes amigos de fé do grupo de oração universitário (GOU) Água Viva, Tatiane Tokairin, Mateus Mendes, Antonio Pádua, Andrea Domingues, Natalia Arruda, Geraldo Costa, Mariana Pontin, Marina Losi, Leandro Silva, Andreia Nascimento, Anna Neto, Dallila Rezende, Fredy, Ariane Silveira, Bárbara Della Antonia, Rebecca Riet, Ana Carolina, Márcio Rezende, Vanessa Queiroz e Patrícia Souza, por todos os momentos de convívio, partilha, confraternizações e orações em que passei junto de vocês.

Aos colegas de moradia que tive ao longo desses três anos, Marinaldo, Valdevan, Adriano, Pablo, Conan, Maicon, Otávio, Cibele, Clíssia, Luanna, Lilian, pela companhia e momentos de alegria e amizade.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) na pessoa dos pesquisadores MSc. Alan Diego da Conceição Santos, e Dr. Andersson Barison, parceiros nas análises de ressonância magnética nuclear.

Ao Instituto Federal de São Paulo, campus Matão-SP na pessoa do professor Dr. Danilo Luiz Flumignan pela oportunidade de parceria e por todo o apoio nas análises de qualidade de óleo e biodiesel, e a todos técnicos de laboratório e alunos envolvidos na participação e auxílio nessas análises. Deixo o meu agradecimento ao Cempec/IQ/Unesp campus de Araraquara-SP pelas análises de cromatografia gasosa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de doutorado.

À todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho: Meu muito obrigado! Que Deus na sua infinita bondade abençoe a cada um.

“Não vos lembreis mais dos acontecimentos de outrora, não recordeis mais das coisas antigas, porque eis que vou fazer obra nova, a qual já surge: não a vedes?”

(Isaías 43:18-19a)

“Vontade de Deus és o meu paraíso.”

(Santa Paula Frassinetti)

“Não entristeça o seu coração por causa das aflições, antes medita na Lei do Senhor e alegra-te; pois o Senhor usa de meios que nós não entendemos para testar e treinar a nossa fé, para nos fortalecer. E por mais difícil que seja, confie. Confie no Senhor e Ele te abençoará.”

(Autor desconhecido)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 A cultura do pinhão-mansô (<i>Jatropha curcas</i> L.)	25
2.2 Potencialidades e limitações para o cultivo do pinhão-mansô	29
2.3 Fatores que afetam o desenvolvimento e a produtividade do pinhão-mansô	34
2.3.1 Exigências climáticas para o cultivo do pinhão-mansô	35
2.3.2 Condições e uso do solo	37
2.3.3 Irrigação e adubação nitrogenada no pinhão-mansô	39
2.4 Qualidade do óleo vegetal para produção de biocombustíveis	44
2.4.1 Perfil composicional de ácidos graxos	45
2.4.2 Índices de qualidade	49
3 MATERIAL E MÉTODOS	53
3.1 Caracterização da área experimental	53
3.2 Descrição dos tratamentos e delineamento experimental	54
3.3 Caracterização do solo	56
3.4 Caracterização da água de irrigação	57
3.5 Manejo da irrigação	58
3.6 Monitoramento da umidade do solo	61
3.7 Manejo da cultura	62
3.8 Produtividade da cultura e produtividade da água	63
3.9 Análises de crescimento	64
3.10 Índice de área foliar (IAF)	65
3.11 Índice de clorofila	67
3.12 Teor e análises de qualidade de óleo	68
3.12.1 Teor de óleo	69
3.12.2 Análises preliminares dos índices de qualidade do óleo	70
3.12.3 Índice de acidez	71
3.12.4 Índice de iodo	71

3.12.5 Índice de peróxido.....	72
3.12.6 Índice de refração.....	72
3.12.7 Densidade relativa.....	73
3.12.8 Estabilidade oxidativa.....	73
3.12.9 Identificação e quantificação de ácidos graxos.....	74
3.13 Análise dos dados.....	75
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
4.1 Monitoramento meteorológico.....	77
4.2 Irrigações realizadas.....	79
4.3 Monitoramento da umidade do solo.....	80
4.4 Produtividade da cultura	84
4.5 Produtividade da água.....	88
4.6 Análise de crescimento	91
4.7 Índice de área foliar (IAF)	109
4.8 Índice de clorofila	113
4.9 Teor e análises de qualidade de óleo.....	120
5 CONCLUSÕES	135
REFERÊNCIAS.....	137

RESUMO

Influência da irrigação e da adubação nitrogenada na produção e qualidade do óleo das sementes de pinhão-mansão

Com a busca de novas soluções para a produção de energia sustentável, novas fontes renováveis têm sido tema de estudos para o suprimento de energia no mundo, diminuindo a dependência por combustíveis fósseis. O biodiesel pode ser usado para geração de energia em substituição ao óleo diesel e, com isso, muitas espécies oleaginosas têm sido estudadas para esse fim. O pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) é uma espécie da família Euforbiácea que tem se destacado por ser uma planta perene, rústica e com elevada produção de óleo. O conhecimento dos efeitos da irrigação e da fertilização nitrogenada no seu cultivo se tornam relevantes para um melhor manejo dessa cultura. Este estudo teve como objetivo principal avaliar os efeitos de diferentes níveis de adubação nitrogenada e de irrigação na produtividade, no crescimento vegetativo e na qualidade de óleo no cultivo do pinhão-mansão. O experimento foi conduzido em uma área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, em Piracicaba-SP. Os estudos foram realizados nos anos agrícolas de 2013/2014 e 2014/2015, com plantas a partir do terceiro ano de cultivo e dispostas em espaçamento 3 x 4 m, totalizando 833 plantas ha⁻¹. Os tratamentos foram dispostos aleatoriamente em duas áreas de cultivo, com blocos compostos de quatro repetições, sendo os fatores constituídos de dois manejos hídricos (irrigado e sem irrigação) e quatro doses de adubação nitrogenada a partir da sua recomendação de adubação (150%, 100%, 50% e 0% de N). Cada área de cultivo era composta pelo tipo de manejo hídrico adotado e a análise dos dados foi feita de forma conjunta, como análise de grupos de experimentos. O sistema de irrigação utilizado foi o pivô central, sendo adotado para toda a área irrigada o mesmo manejo de irrigação. A irrigação e as doses de N tiveram influência positiva nas variáveis de crescimento como altura, índice de área foliar, diâmetro e volume de copa. Todos os teores de clorofila avaliados apresentaram os maiores valores com a prática da irrigação e com as maiores doses de N aplicada, mas apesar dessa diferença, todos os tratamentos aplicados apresentaram baixa correlação com o teor de N foliar. A produtividade de sementes e de óleo de pinhão-mansão também responderam de forma positiva aos tratamentos aplicados, chegando até a triplicar os seus valores com a prática de irrigação e da adubação de N. O teor de óleo, por sua vez, não mostrou variação dos tratamentos quanto ao seu conteúdo intrínseco por unidade de massa de sementes, mas o fator manejo hídrico influenciou nos valores de alguns índices de qualidade de óleo, como acidez, iodo, peróxido e estabilidade oxidativa, nos quais os tratamentos irrigados apresentaram, de uma forma geral, os melhores resultados. Com isso, conclui-se que, mesmo sendo adaptado a condições adversas de clima e solo, o pinhão-mansão responde bem à prática da irrigação e da adubação nitrogenada, aumentando sua produtividade, melhorando seu desenvolvimento vegetativo e qualidade de óleo para a produção de biodiesel.

Palavras-chave: *Jatropha curcas* L.; Manejo hídrico; Fertilização mineral; Biocombustíveis

ABSTRACT

Influence of irrigation and nitrogen fertilization in yield and quality of oil from jatropha seeds

With the search for new solutions for the sustainable energy production, new renewable energy sources have been the subject of studies for the power supply in the world, reducing dependence on fossil fuels. Biodiesel can be used for power generation as a substitute for oil diesel, which have increased the interest on oilseeds crops studies. The jatropha (*Jatropha curcas* L.) is a species of the Euforbiaceae family that has stood out for being a perennial, rustic, and high yield of oil plant. The knowledge of the effects of irrigation and nitrogen fertilization on the cultivation become relevant for a better crop management. The main objective of this study was the evaluation of the effects of different levels of nitrogen fertilization and irrigation on productivity, vegetative growth and oil quality in the jatropha crop. The experiment was conducted in an experimental area of the Department of Biosystems Engineering at ESALQ/USP, in Piracicaba-SP. The studies were conducted in the agricultural years of 2013/2014 and 2014/2015, with plants from the third year of cultivation, arranged in 3x4 meters spacing, totaling 833 plants ha⁻¹. The treatments were randomly arranged in two cultivation areas with blocks composed of four repetitions being the factors consisted of two water management (irrigated and without irrigation) and four doses of nitrogen fertilization from its fertilizer recommendation (150%, 100%, 50% and 0% N). Each cultivation area was composed by the type of water management adopted and the data analysis was made jointly as experiments group analysis. The irrigation system used was the center pivot, being adopted for the entire irrigated area the same irrigation management. The irrigation and nitrogen levels had a positive influence on growth variables such as height, diameter and canopy volume. All evaluated chlorophyll levels reached the highest values with the practice of irrigation and higher nitrogen levels applied, but despite of this difference, all treated samples showed low correlation with leaf nitrogen content. The productivity of seeds and jatropha oil also responded positively to the treatments applied, reaching three times their values with the practice of irrigation and nitrogen fertilization. The oil content did not vary with treatments as to its intrinsic content per unit mass of seeds, and only the water management factor influenced the values of some oil quality indices such as acidity, iodine, peroxide and oxidative stability, when the irrigated treatments showed better results in general. Thus, it is concluded that even though being adapted to adverse conditions of climate and soil, jatropha responds well to practices of irrigation and nitrogen fertilization, increasing its productivity and improving its vegetative growth and quality of oil for biodiesel production.

Keywords: *Jatropha curcas* L.; Water management; Mineral fertilization; Biofuels

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes que compõe a planta de pinhão-manso: ramo com inflorescências (a), caule (b), folha (c), pistilo – flor feminina (d), estame – flor masculina (e), fruto em corte transversal (f), frutos (g), fruto em corte longitudinal (h), semente (i). Fonte: Heller (1996).....	26
Figura 2 - Níveis de produtividades estimadas para a cultura do pinhão-manso	39
Figura 3 - Tipos de ácidos graxos.....	46
Figura 4 - Croqui da área experimental contendo as áreas de cada manejo hídrico e a estação meteorológica.....	54
Figura 5 - Esquema da distribuição dos tratamentos na área sem irrigação.....	55
Figura 6 - Balanço hídrico do sistema de lisímetro de pesagem com as entradas e saídas de água do sistema, sendo ET a evapotranspiração, E a evaporação, T a transpiração, I a irrigação, R o escoamento superficial e P a precipitação. Fonte: Lena (2013).....	59
Figura 7 - Medição da altura em plantas de pinhão-manso	65
Figura 8 - Metodologia adotada para a calibração do equipamento LAI 2200, com a escolha da planta (a); leitura do IAF estimado com o LAI 2200 (b); retirada de todas as folhas da planta (c) e determinação em laboratório do IAF real da planta com o equipamento CI-203 (d).	67
Figura 9 - Leitura do Índice de Clorofila FALKER utilizando o ClorofiLOG	68
Figura 10 - Rancimat em operação para determinação de estabilidade oxidativa (a) e esquema de funcionamento do equipamento (b)	74
Figura 11 - Dados meteorológicos observados durante o primeiro e o segundo ciclo de avaliação da cultura.....	78
Figura 12 - Lâminas de irrigação aplicadas durante o primeiro ciclo de avaliação da cultura.	80
Figura 13 - Variação da umidade do solo ao longo do tempo nos tratamentos sem irrigação .	81
Figura 14 - Armazenamento de água no solo na camada de 0-0,8 m para os quatro tratamentos de adubação nitrogenada e dentro do lisímetro na área sem irrigação utilizando a sonda de capacitância Diviner 2000	82
Figura 15 - Variação da umidade do solo ao longo do tempo nos tratamentos irrigados	83
Figura 16 - Armazenamento de água no solo na camada de 0-0,8 m para os quatro tratamentos de adubação nitrogenada e dentro do lisímetro na área irrigada utilizando a sonda de capacitância Diviner 2000.....	83

Figura 17 - Produtividade de sementes do pinhão-mansô em função das diferentes doses de adubo nitrogenado aplicado no terceiro ano de cultivo	85
Figura 18 - Produtividade de sementes do pinhão-mansô em função das diferentes doses de adubo nitrogenado aplicado no quarto ano de cultivo	86
Figura 19 - Produtividade de água para a cultura do pinhão-mansô para todos os tratamentos no terceiro ano de cultivo.....	88
Figura 20 - Produtividade da água do pinhão-mansô em função das diferentes doses de adubo nitrogenado aplicado no terceiro ano de cultivo	90
Figura 21 - Altura média do pinhão-mansô (m) em função do uso ou não da irrigação complementar (a) e das doses de nitrogênio (b) durante o terceiro e quarto ano de cultivo.....	92
Figura 22 – Perfis médios da altura das plantas de pinhão-mansô para os dois anos de avaliação.....	95
Figura 23 - Linhas de tendência para altura de plantas de pinhão-mansô em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2013/14.....	96
Figura 24 – Linhas de tendência para altura de plantas de pinhão-mansô em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2014/15.....	96
Figura 25 - Diâmetro médio de copa do pinhão-mansô (m) em função do uso ou não da irrigação complementar (a) e das doses de nitrogênio (b) durante o terceiro e quarto ano de cultivo	98
Figura 26 – Perfis médios do diâmetro de copa das plantas de pinhão-mansô para os dois anos de avaliação	101
Figura 27 - Linhas de tendência para diâmetro médio de copa das plantas de pinhão-mansô em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2013/14.....	102
Figura 28 - Linhas de tendência para diâmetro médio de copa das plantas de pinhão-mansô em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2013/14.....	103
Figura 29 - Volume de copa do pinhão-mansô (m ³) em função do uso ou não da irrigação complementar (a) e das doses de nitrogênio (b) durante o terceiro e quarto ano de cultivo.....	105

Figura 30 – Perfis médios do volume de copa de pinhão-manso para os dois anos de avaliação	107
Figura 31 - Linhas de tendência para o volume médio de copa das plantas de pinhão-manso em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2013/14	108
Figura 32 - Linhas de tendência para o volume médio de copa das plantas de pinhão-manso em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2014/15	108
Figura 33 - Equação de calibração do IAF para o equipamento LAI 2200.....	110
Figura 34 – Perfis médios do IAF de pinhão-manso em função da dose de nitrogênio aplicada e do manejo hídrico adotado.....	111
Figura 35 - Linhas de tendência para o índice de área foliar (IAF) das plantas de pinhão-manso em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2014/15.....	112
Figura 36 - Variação temporal dos teores de clorofila total em função doses de nitrogênio (a) e do manejo hídrico (b) para o terceiro ano de cultivo.....	114
Figura 37 - Teores de clorofila total em função das doses de nitrogênio aplicada para o quarto ano de cultivo.....	114
Figura 38 - Teores de clorofila total em função do manejo hídrico adotado para o quarto ano de cultivo	115
Figura 39 – Perfis médios dos índices de clorofila do pinhão-manso para o segundo ciclo de avaliação	118
Figura 40 - Variação temporal dos teores de N foliar em função das doses de N aplicadas na planta (a) e do manejo hídrico adotado (b).....	119
Figura 41 - Produtividade de óleo do pinhão-manso em função das diferentes doses de adubo nitrogenado aplicado no terceiro ano de cultivo.....	123
Figura 42 - Produtividade de óleo do pinhão-manso em função das diferentes doses de adubo nitrogenado aplicado no quarto ano de cultivo.....	123
Figura 43 - Quantificação e composição primária dos ácidos graxos do óleo de pinhão-manso para todos os tratamentos avaliados	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre a produtividade média de sementes e o rendimento de óleo de algumas culturas oleaginosas produzidas no Brasil.....	30
Tabela 2 - Necessidade de nutrientes na cultura do pinhão-manso durante os quatro primeiros anos de cultivo	41
Tabela 3 - Esquema da análise de variância	56
Tabela 4 - Composição textural do solo da área experimental.....	56
Tabela 5 - Análise química da área experimental.....	57
Tabela 6 - Resultados da análise físico-química da água utilizada para irrigação	58
Tabela 7 - Teor médio de óleo por meio de prensagem mecânica e por solvente químico nos frutos colhidos na área experimental antes da instalação dos tratamentos	70
Tabela 8 - Índices de qualidade do óleo de pinhão-manso para a área experimental.....	70
Tabela 9 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas observadas na área experimental	77
Tabela 10 - Valores de F para produção de frutos (Prod.F) e sementes (Prod.S) em kg pl ⁻¹ , relação semente/fruto (Rel.S/F) e produtividade de sementes (P.S.) em kg ha ⁻¹	84
Tabela 11 - Produtividade média das sementes de pinhão-manso (kg ha ⁻¹) em função do manejo hídrico e doses de nitrogênio aplicado.....	84
Tabela 12 – Análise de variância para produtividade de água (PA) no terceiro ano de cultivo	89
Tabela 13 – Análise univariada de perfil para altura de plantas durante o ciclo 2013/14.....	92
Tabela 14 – Análise univariada de perfil para altura de plantas durante o ciclo 2014/15.....	93
Tabela 15 – Teste de esfericidade de Mauchly para altura de plantas para os dois ciclos de avaliação	93
Tabela 16 – Resultados dos testes multivariados para os fatores entre e intra indivíduos para a variável altura no segundo ciclo de avaliação	94
Tabela 17 – Análise de regressão para altura de plantas em função do dia após a poda (DAP) para todos os tratamentos nos dois anos de avaliação	96
Tabela 18 - Equações de ajuste para altura de plantas de pinhão-manso em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada e do manejo hídrico adotado para os dois ciclos de avaliação	97
Tabela 19 – Análise univariada de perfis para diâmetro de copa durante o ciclo 2013/14.....	99

Tabela 20 – Análise univariada de perfis para diâmetro de copa durante o ciclo 2014/15	99
Tabela 21 – Teste de esfericidade de Mauchly para diâmetro de copa para os dois ciclos de avaliação	100
Tabela 22 – Resultados dos testes multivariados para os fatores entre e intra indivíduos para a variável diâmetro de copa no segundo ciclo de avaliação	100
Tabela 23 - Análise de regressão para diâmetro de copa em função do dia após a poda (DAP) para todos os tratamentos nos dois anos de avaliação	102
Tabela 24 - Equações de ajuste para diâmetro de copa das plantas de pinhão-mansinho em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicadas e do manejo hídrico adotado para os dois ciclos de avaliação	104
Tabela 25 – Análise univariada de perfis para volume de copa durante o ciclo 2013/14.....	106
Tabela 26 – Análise univariada de perfis para volume de copa durante o ciclo 2014/15.....	106
Tabela 27 – Teste de esfericidade de Mauchly para o volume de copa para os dois ciclos de avaliação	106
Tabela 28 - Análise de regressão para diâmetro de copa em função do dia após a poda (DAP) para todos os tratamentos nos dois anos de avaliação	108
Tabela 29 - Equações de ajuste para o volume de copa das plantas de pinhão-mansinho em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada e do manejo hídrico adotado para os dois ciclos de avaliação	109
Tabela 30 - Análise univariada de perfis para IAF durante o ciclo 2014/15	111
Tabela 31 - Análise de regressão para o IAF em função do dia após a poda (DAP) para todos os tratamentos, no segundo ano de avaliação	112
Tabela 32 - Equações de ajuste para o IAF das plantas de pinhão-mansinho em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicadas e do manejo hídrico adotado para o segundo ciclo de avaliação	112
Tabela 33 - Valores médios dos índices de clorofila total, A e B (ICF) e da relação clorofila A/B das folhas de pinhão-mansinho para todos os tratamentos avaliados no primeiro ciclo de avaliação.....	115
Tabela 34 - Valores médios dos índices de clorofila total, A e B (ICF) e da relação clorofila A/B das folhas de pinhão-mansinho para todos os tratamentos avaliados no segundo ciclo de avaliação.....	116
Tabela 35 – Resumo da análise univariada de perfis para os índices de Clorofila para o ciclo 2014/15	117

Tabela 36 – Teste de esfericidade de Mauchly para os índices de clorofila e N foliar do pinhão-mansó	118
Tabela 37 - Coeficientes de correlação de Pearson entre o nitrogênio foliar e os teores de clorofila na planta.....	119
Tabela 38 - Valores de F para o teor médio (%) e a produtividade de óleo (kg ha^{-1}) em sementes de pinhão-mansó para todos os tratamentos avaliados	120
Tabela 39 - Valores Médios do teor e produtividade de óleo em função do manejo hídrico e da dose de nitrogênio aplicada	121
Tabela 40 - Valores de F para os índices de acidez (IA), iodo, peróxido (IP) e estabilidade oxidativa (EO) para os dois ciclos de avaliação.....	124
Tabela 41 - Valores médios dos índices de qualidade de óleo em função do manejo hídrico adotado nos dois ciclos de avaliação.....	125
Tabela 42 - Perfil composicional dos óleos de pinhão-mansó (%) dos tratamentos avaliados no ciclo 2013/14	128
Tabela 43 - Perfil composicional dos óleos de pinhão-mansó (%) dos tratamentos avaliados no ciclo 2014/15	128
Tabela 44 - Caracterização do biodiesel obtido do óleo de pinhão-mansó para os dois experimentos de manejo hídrico	132

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a maior parte da energia consumida no mundo provém do petróleo, do carvão e do gás natural. Entretanto, essas são fontes não renováveis e possuem previsão de esgotamento em um futuro próximo. Além disso os combustíveis fósseis são fontes muito poluidoras e afetam o meio ambiente de forma severa, o que faz a população mundial buscar soluções para tais problemas. Com a crescente necessidade de encontrar fontes alternativas de energia para substituir os combustíveis fósseis, diversas plantas vêm sendo estudadas por institutos de pesquisas e empresas. A produção de biocombustíveis, por meio do desenvolvimento dos setores agroenergéticos, pode se tornar uma solução viável para o suprimento da demanda energética mundial.

Produzido a partir de fontes renováveis como óleos vegetais e gorduras animais, o biodiesel pode ser usado para geração de energia em substituição ao óleo diesel e ao óleo combustível. O uso do biodiesel pode trazer uma série de benefícios associados à redução dos gases de efeito estufa e de outros poluentes atmosféricos, tais como o enxofre, além de promover redução do consumo de combustíveis fósseis. No Brasil, a produção do biodiesel pode cooperar com o desenvolvimento econômico de diversas regiões do país, uma vez que é possível explorar a melhor alternativa de matéria-prima em cada região. Com isso, em função de fatores como a vasta extensão territorial e a grande diversidade de climas, solos e espécies oleaginosas, o Brasil encontra-se em uma situação bastante promissora.

O pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) destaca-se entre as oleaginosas com potencial para a produção de biodiesel. Esta cultura é apropriada ao cultivo em quase todo o país devido a sua rusticidade e à resistência a condições adversas de clima e solo (SATURNINO et al., 2005), principalmente ao estresse hídrico, sendo tolerante à seca e podendo ser usada em áreas marginais ou degradadas sem a competição com culturas para fins de alimentação. Aliado a esses fatores, a alta porcentagem de óleo por unidade de semente dessa espécie, em comparação com algumas culturas oleaginosas tradicionalmente cultivadas no país e em outras regiões do mundo, atrai a atenção de pesquisadores de diversos centros de pesquisa ao redor do mundo para o conhecimento e o aprimoramento dessa cultura como uma matriz energética para a produção de biodiesel.

Contudo, limitações técnicas têm impedido a inserção imediata do pinhão-mansão na matriz energética brasileira. Por se tratar ainda de uma planta não domesticada, suas características agrônomicas não são completamente entendidas e os efeitos do ambiente sobre

as plantas não têm sido completamente investigados. Os resultados de pesquisas com a cultura no Brasil ainda são incipientes, tendo início faz pouco mais de dez anos, de forma que ainda há grande falta de informações sobre a cultura no país, principalmente no que diz respeito às suas demandas nutricionais e ao seu consumo hídrico.

Considerado por apresentar características como rusticidade e adaptabilidade a condições adversas de clima e solo, o pinhão-manso, assim como a maioria das culturas agrícolas, possivelmente pode obter uma boa resposta quando suprido das suas necessidades hídricas e nutricionais. A adubação e a aplicação de água podem aumentar o rendimento de sementes e óleo do pinhão-manso. Mas, a falta de informações sobre o cultivo de plantas adultas, a partir do seu pico de produção (4º ano), e da qualidade do seu óleo sob a influência dessas variáveis, não permite que se tenha um adequado manejo hídrico e nutricional da cultura, uma vez que não se conhece a fundo a resposta da planta, pois trata-se ainda de uma cultura com variadas expressões agronômicas.

Sob a hipótese de que o uso da irrigação e a aplicação de diferentes doses de nitrogênio afetam os componentes de produção, o crescimento vegetativo e a qualidade do óleo do pinhão-manso, desenvolveu-se este trabalho com o objetivo principal de avaliar os efeitos dos diferentes níveis de adubação nitrogenada e de irrigação na produtividade, no crescimento vegetativo e na qualidade de óleo, no terceiro e quarto ano do cultivo de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) nas condições edafoclimáticas de Piracicaba-SP. Os objetivos secundários foram avaliar os efeitos da irrigação complementar e da adubação nitrogenada em variáveis de crescimento das plantas de pinhão-manso; os níveis de clorofila de cada tratamento e a correlação desses teores com os valores de N foliar; e os efeitos de cada tratamento sobre o rendimento, o perfil composicional de ácidos graxos e os índices de qualidade do óleo do pinhão-manso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura do pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.)

O pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) pertence à família Euphorbiaceae, a mesma da mandioca, mamona e seringueira, e que compreende aproximadamente 8.000 espécies, com cerca de 320 gêneros. As plantas do gênero *Jatropha* contêm 160 espécies, aproximadamente, entre herbáceas e arbustivas, e apresentam valor medicinal, ornamental e algumas são produtoras de óleo, como é o caso da espécie *Jatropha curcas* L. (SUJATHA; DHINGRA, 1993).

Esta espécie destaca-se entre as oleaginosas com potencial para a produção de biodiesel, além de apresentar características desejáveis, tais como: potencial de altos rendimentos de grãos e óleo, boa qualidade do óleo para a produção de biodiesel, adaptabilidade a diferentes regiões, precocidade e longevidade. É uma planta reivindicada como tolerante à seca, tem menos necessidade de nutrientes, utiliza insumos trabalhistas mais baixos e não compete com a produção de alimentos se cultivada em terras marginais. Consequentemente, o pinhão-mansão é uma planta oleaginosa com potencial para o desenvolvimento ambiental sustentável (PANDEY et al., 2012).

Podendo ser um arbusto ou árvore pequena de crescimento rápido, o pinhão-mansão pode atingir até três metros de altura com diâmetro de tronco de aproximadamente 20 cm, mais em condições especiais de cultivo pode atingir até cinco metros de altura e diâmetro variando de 20 a 30 cm. O pinhão-mansão possui, caule liso, de lenho mole e medula desenvolvida, mas pouco resistente, e floema com longos canais, que se estendem até as raízes, nos quais circula o látex (HELLER, 1996; SATURNINO et al., 2005). O tronco, que contém látex, é dividido desde a base, em ramos que são revestidos por uma camada grossa, com cicatrizes produzidas pela queda das folhas na estação seca (DIAS et al., 2007; HENNING, 2009). Em resumo, trata-se de uma planta perene, de crescimento rápido e caducifólia, a qual geralmente leva de quatro a cinco anos para atingir a maturidade, com expectativa de vida em torno de 50 anos (DRUMOND et al., 2010).

A planta desenvolve uma raiz principal e quatro raízes laterais, sendo que a raiz pivotante não é normalmente formada quando as plantas advêm de propagação vegetativa (HELLER, 1996). As folhas são verdes, largas, lisas e lobadas, com nervuras esbranquiçadas na face inferior. É uma planta monoica e as inflorescências terminais contêm de 5 a 20 flores femininas, que se abrem em dias diferentes (SATURNINO et al., 2005). Em cada

inflorescência desabrocham primeiro as flores femininas, seguindo o sentido de baixo para cima na planta. Do mesmo modo, ocorrem a frutificação e a maturação. Os frutos fecundados tardiamente continuam a crescer depois da maturação dos primeiros frutos de um cacho, o que gera colheita em diferentes épocas do ano.

O fruto é capsular, oblongo, com diâmetro de 1,5 a 3,0 cm, trilocular, podendo apresentar até quatro sementes, sendo formado por um pericarpo ou casca dura e lenhosa, indeiscente, inicialmente verde, passando a amarelo, castanho e por fim preto, quando atinge a maturação fisiológica (DIAS et al., 2007). A semente é ovalada, endospermica, tegumento rijo, quebradiço, de fratura resinosa. Na maturação, contém de 53 a 62% de sementes e de 38 a 47% de casca, pesando cada uma de 1,53 a 2,85 g (SATURNINO et al., 2005). Na Figura 1 estão apresentadas as diferentes partes constituintes da planta do pinhão-manso.

Figura 1 - Partes que compõe a planta de pinhão-manso: ramo com inflorescências (a), caule (b), folha (c), pistilo – flor feminina (d), estame – flor masculina (e), fruto em corte transversal (f), frutos (g), fruto em corte longitudinal (h), semente (i). Fonte: Heller (1996)

De toda a morfologia da planta, o sistema radicular é o que necessita de maiores informações quanto a sua real distribuição no perfil do solo e a sua absorção dos nutrientes presentes na solução do solo, existindo pouquíssimos trabalhos na literatura que descrevem com clareza o seu sistema radicular, sendo restrito a condições específicas da região. Alves Júnior et al. (2014) avaliaram a distribuição espacial do sistema radicular do pinhão-mansinho no Cerrado brasileiro e encontraram uma profundidade média e distância horizontal respectivamente de 0,60 e 0,75 m para plantas com 17 meses de idade e de 1,0 e 1,0 m para plantas de 36 meses de idade. Nunes et al. (2009) e Ye et al. (2009) relatam que em solos de baixa densidade a raiz do pinhão-mansinho pode chegar ao dobro do comprimento da parte aérea. Estas informações contradizem o que se achava a respeito da cultura do pinhão-mansinho, pois diversos autores afirmaram a respeito do sistema radicular da cultura como sendo curto e pouco ramificado (HELLER, 1996; ARRUDA et al., 2004; SATURNINO et al., 2005).

O óleo bruto dos grãos é a principal matéria-prima do pinhão-mansinho e o seu rendimento depende de diversas características da planta associadas aos fatores edafoclimáticos. Entre os principais componentes da produtividade, destacam-se as características vegetativas da planta: o número de ramos, o diâmetro da copa, a altura das plantas, o volume de copa, a produtividade de grãos por árvore, e entre as características de qualidade da matéria-prima: o “peso de grãos”, “peso de amêndoas”, “peso de casca” (RAO et al., 2008). O óleo é o produto de maior valor agregado da cultura do pinhão-mansinho e apresenta propriedades como uma maior estabilidade oxidativa do que o óleo de soja, menor viscosidade quando comparado ao da mamona e melhores propriedades a frio que o óleo de palma (TAPANES et al., 2008).

Quanto à porcentagem de óleo, destaca-se seu alto teor por unidade de massa, com uma variação de 27 a 38%, o que representam de 53 a 79% do peso do fruto (ARRUDA, 2004; DIAS et al., 2007). Porém, os teores de óleo podem variar de acordo com as características genéticas, tecnologia de produção e de extração adotadas (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000; MARQUES, 2007). Diferentes métodos podem ser utilizados para a extração de óleos vegetais como a prensagem mecânica, a extração com solvente e a extração com fluido supercrítico. Pelo método de extração com solvente de Soxhlet obtém-se maior quantidade de óleo em relação a outros métodos, pois a amostra permanece em contato com o solvente pela evaporação e condensação do mesmo sobre a amostra (BRUM; ARRUDA; REGITANO-D’ARCE, 2009). Entretanto, por ser de baixo custo, a prensagem mecânica é o método mais utilizado para extração de óleo nas indústrias.

Com relação a composição do óleo, Visentainer e Santos Júnior (2013) relatam que do teor médio de óleo encontrado nas sementes, cerca de 60,8% são compostos basicamente por 14,3% de ácido palmítico, 5,1% de ácido esteárico, 41,1% de ácido oleico e 38,1% de ácido linoleico, possuindo ao final um valor médio de 20% de ácidos graxos saturados e 80% de ácidos insaturados. Entretanto, assim como nas demais culturas oleaginosas, a composição e teor de cada ácido graxo de óleos vegetais com potencial para biocombustíveis podem variar de acordo com as condições climáticas, classe de solo, localização geográfica, estágio de maturação das sementes, variedades e práticas agronômicas, entre outros fatores (BERTI; JOHNSON, 2008; KHEIRA; ATTA, 2009; HATHURUSINGHA; ASHWATH; MIDMORE, 2011; SEZEN et al., 2011; AKBARIAN; MODAFEBEHZADI; BAGHERIPOUR, 2012; RAMANJANEYULU; REDDY; MADHAVI, 2013; RODRIGUES et al., 2013; SINHA et al. 2015).

O pinhão-mansão apresenta alta tolerância à seca sendo cultivada em diversos países do mundo, principalmente no semiárido tropical (FAIRLESS, 2007; ACHTEN et al., 2008). A elevada tolerância à seca aliada ao caule suculento de plantas de pinhão-mansão está associada ao metabolismo C_3 -CAM existente nesta espécie, funcionando em condições de déficit hídrico o metabolismo CAM (LUTTGE, 2008). As plantas CAM são adaptadas à escassez de água porque perdem pouca água por transpiração durante aquisição de CO_2 , uma vez que os estômatos abrem-se no período noturno e permanecem fechados durante o dia. Segundo Pimentel (1998), algumas plantas CAM facultativas podem atingir alta produtividade, quando funcionando como C_3 ; porém, quando essas plantas apresentam o comportamento CAM, devido à um estresse ambiental, a acumulação de matéria seca é reduzida.

A distribuição geográfica do pinhão-mansão é bastante vasta, devido a sua rusticidade, resistência a longas estiagens e às infestações de pragas e doenças, sendo adaptável às adversidades de solo e clima. Segundo Openshaw (2000), a espécie está distribuída, principalmente, nas Américas, na África e em parte da Ásia; sendo largamente cultivada no México, Nicarágua, Tailândia e em partes da Índia. No Brasil, sua distribuição geográfica se estende por boa parte do território, sendo encontrada desde a região Nordeste, Sudeste e até o Estado do Paraná (ARRUDA et al., 2004). Alguns pesquisadores apontam o Brasil como provável centro de origem devido à distribuição ao longo de todo o país (SUJATHA; DHINGRA, 1993; ARRUDA et al., 2004; SATURNINO et al., 2005); porém, muitos estudos estão evidenciando como centro de diversidade genética e, possível centro de origem o norte da América Latina, destacando-se México e Guatemala (HELLER, 1996; MAES et al., 2009b; PECINA-QUINTERO et al., 2014). Estudos realizados por Núñez-Colín e Goytia-

Jiménez (2009) para determinação da distribuição da espécie e dos padrões climáticos da região de origem apontaram o México e o norte da América Central como o centro de diversidade da espécie. No México, a diversidade genética é citada na literatura como sendo expressiva, sobretudo por ocorrer naturalmente o genótipo atóxico, sem a presença de ésteres de forbol. É comum no país a população de alguns estados se alimentarem da polpa ou sementes de pinhão-manso, tradição existente desde a época dos maias, sendo mais praticado nos estados de Veracruz e Puebla (MAKKAR et al., 1997; MARTÍNEZ-HERRERA et al., 2006). Não se tem relatos de ocorrência do genótipo atóxico fora do México.

2.2 Potencialidades e limitações para o cultivo do pinhão-manso

O Brasil, com sua vasta extensão territorial e variedade climática, apresenta um enorme potencial para a produção de diferentes espécies de oleaginosas que podem ser utilizadas na síntese do biodiesel, destacando-se: a soja, a mamona, o girassol, o amendoim, a palma de óleo, a canola e o pinhão-manso. A viabilidade de cada oleaginosa depende de sua competitividade técnica, econômica e socioambiental, além de aspectos como o teor de óleo, a produtividade por unidade de área, a adequação a diferentes sistemas produtivos, sazonalidade e demais aspectos relacionados ao ciclo de vida da planta (VISENTAINER; SANTOS JÚNIOR, 2013).

A cultura da soja destaca-se no cenário brasileiro dentre as principais matérias-primas utilizadas para a produção do biodiesel, sendo 80% do óleo produzido no país oriundo desta oleaginosa. A previsão é que esta situação não se modificará nos próximos anos, visto que esta cultura tem uma cadeia produtiva organizada e está no limite da fronteira tecnológica mundial, sendo o Brasil, nos últimos anos, o segundo maior produtor mundial; porém o seu rendimento em óleo é baixo (Tabela 1) (VISENTAINER; SANTOS JÚNIOR, 2013). O pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) vem sendo fonte de estudos nos últimos anos, devido ao seu grande potencial na produção de óleo para biocombustíveis, chegando a apresentar teor de óleo variando entre 32 a 40% quando extraído por meio de prensagem mecânica, o que garante a esta cultura altas produtividades médias de grãos e de óleo quando comparada com outras culturas cultivadas no país (Tabela 1).

Tabela 1 - Relação entre a produtividade média de sementes e o rendimento de óleo de algumas culturas oleaginosas produzidas no Brasil

Cultura	Produtividade média de sementes (kg ha⁻¹ ano⁻¹)	Teor médio de óleo (%)	Rendimento médio em óleo (kg ha⁻¹ ano⁻¹)
Soja	2.800	20	560
Palma de óleo	15.000	26	4.000
Girassol	1.800	45	774
Algodão	1.900	19	361
Amendoim	2.400	45	788
Mamona	1.000	48	470
Canola	1.500	38	570
Pinhão-manso	5.000	38	1.900

Fonte: Ministérios da Agricultura Pecuária e Abastecimento-MAPA (2007).

Por ser o biodiesel um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, como os óleos vegetais “virgens” ou já utilizados e das gorduras animais, são evidentes as vantagens da sua utilização na redução da emissão de gases poluentes e no balanço de carbono quando comparado com o diesel fóssil. No caso do biodiesel de pinhão-manso, pode-se obter uma redução de 55% na emissão de fuligem e de 35% na liberação de hidrocarboneto que, aliás, é uma substância cancerígena. Além disso, o gás carbônico gerado na queima é consumido no processo de fotossíntese realizado nas lavouras de plantas oleaginosas e devolvido à atmosfera como oxigênio, criando dessa forma, um ciclo fechado de produção sem sobras poluentes (CARNIELLI, 2003).

Com relação à utilização do óleo produzido a partir de sementes de pinhão-manso, para a produção de biocombustível, pode-se obter basicamente dois produtos. O primeiro e mais conhecido é o biodiesel, que pode ser utilizado em substituição ao diesel de origem fóssil (ACHTEN et al., 2008). A segunda alternativa, que até o momento só foi utilizada em pequena escala, é o bioquerosene, que pode ser utilizado em substituição ao querosene de aviação. Alguns testes, neste sentido, como voos experimentais, já foram até realizados por companhias aéreas e se mostraram muito satisfatórios com relação à viabilidade técnica do biocombustível.

O pinhão-manso é uma oleaginosa com grande potencial para produção de biodiesel, sendo que sua produção de óleo pode chegar a 1,5 Mg ha⁻¹.ano⁻¹. Como algumas vantagens, esta cultura apresenta em sua cadeia produtiva a resistência, podendo desta forma ser cultivado em todo o país, facilitando a sua distribuição, e sua colheita, que é manual, o que impulsiona a mão de obra familiar (VISENTAINER; SANTOS JÚNIOR, 2013).

O pinhão-mansão pode ser considerado uma das mais promissoras oleaginosas para substituir o diesel de petróleo, pois as amêndoas além de poderem gerar valores próximos de 40% de óleo extraído por prensagem mecânica, podem render de 50 a 52% de óleo quando extraído a base de solventes. Seu óleo é empregado como lubrificante em motores a diesel e na fabricação de sabão e tinta. Além disso, a torta que resta ao final da extração é um subproduto rico em nitrogênio, potássio, fósforo e matéria orgânica que pode ser utilizado na adubação, tanto da lavoura de pinhão-mansão como em outras culturas (MARTINS; MACHADO; CAVASINI, 2008). Outro fator positivo é a utilização da casca dos pinhões que pode ser usada como carvão vegetal e matéria-prima na fabricação de papel (SLUSZZ; MACHADO, 2011) e da madeira do pinhão-mansão, que assim como as cascas dos frutos, podem ser utilizadas como material carburante de fornalhas (HELLER, 1996; ARRUDA et al., 2004; SATURNINO et al., 2005).

De acordo com Sato et al. (2007), apesar da utilização do óleo extraído da semente do pinhão-mansão para a produção de biocombustível ser o mais difundido, outras partes da planta têm utilização econômica como na medicina tradicional, na produção de sabão, na iluminação por meio de lamparinas, em geradores de eletricidade, combustível para fogões, extratos da semente como molusquicida, inseticida e nematocida. Ainda segundo estes autores a planta é considerada melífera, podendo também ser utilizada como cerca-viva de pastagens e campos agrícolas, pois não é palatável, mourões de cerca “vivos”, e suporte para plantas trepadeiras, como no caso da baunilha (*Vanilla aromatica*).

A cultura além de ser uma boa opção agrícola para áreas áridas, semiáridas e na recuperação de áreas degradadas, promove a integração do acesso à produção com renda (com a venda do óleo das sementes para fins combustíveis); é suprimento de energia (o óleo pode ser utilizado em motores e máquinas para a geração de eletricidade); contribui no desenvolvimento rural (com o emprego da mão-de-obra familiar) e com consequente fixação do homem no campo; segurança alimentar, pois permite o uso de culturas anuais alimentícias em consórcio; além de melhorias ambientais, como a formação de um microclima que favorece o desenvolvimento de outras culturas nas entrelinhas, entre outros (SATO et al., 2007).

No entanto, o cultivo do pinhão-mansão precisa ser aprimorado para torná-lo adequado à produção de matéria prima para a produção de biodiesel. Apesar de possuir características desejáveis, como resistência a seca e rusticidade, limitações técnicas como a maturação desuniforme dos frutos e a baixa produtividade de grãos alcançada em alguns locais têm limitado a viabilidade econômica desse cultivo (ROCHA et al., 2012). Por ser ainda uma

planta silvestre, suas características agrônômicas não são completamente entendidas e os efeitos do ambiente sobre as plantas não têm sido completamente investigados. Para isso, é necessário o estabelecimento de técnicas que propiciem colheita uniforme, com maior qualidade do óleo e redução dos custos de produção (LAVIOLA et al., 2011).

Atualmente não se tem conhecimento de nenhum programa de melhoramento genético que vise a obtenção de um cultivar seguro para a expansão vigorosa dessa cultura. O processo de seleção de acessos de pinhão-manso com excelentes características de cultivo encontra-se recente e na fase inicial em estudos feitos no Brasil (LAVIOLA et al., 2014; PEIXOTO et al., 2016) e em outros países (GINWAL et al., 2005; KAUSHIK et al., 2007; MAES et al., 2009b; WEN et al., 2012a; WEN et al., 2012b). O desenvolvimento de um sistema de cultivo comercial de espécies selvagens de plantas deve ser feito com base no uso de cultivares que apresentem suficiente uniformidade para garantir que a tecnologia de produção adotada seja aproveitada na sua totalidade. A falta desses cultivares não permite recomendações técnicas confiáveis sobre a melhor forma de propagação, população de plantio, adubação, manejo, época e tipo de colheita, controle de pragas e doenças, etc. A inexistência dessas recomendações tornam incertos eventuais investimentos em plantios comerciais (MARQUES, 2007).

Outra limitação conhecida da planta é que as suas sementes são tóxicas para animais e humanos, impedindo que o resíduo das sementes seja utilizado como ração animal. Entre os principais componentes tóxicos presentes no pinhão-manso destacam-se o éster de forbol (12-deoxi-16-Hidroxiforbol), a globulina e a curcasina que podem trazer riscos à saúde caso seja ingerido; a ingestão de uma única semente fresca pode causar tanto vômito quanto diarreia (PEIXOTO, 1973). Segundo Visentainer e Santos Júnior (2013), outro fator negativo deste óleo para a produção de biocombustíveis é o seu alto teor de ácidos graxos poli-insaturados, que favorecem sua rápida oxidação durante a estocagem; mas essa oxidação pode ser acelerada pela ação do calor, do oxigênio ou de traços de metais pesados e de seus cátions, que são comumente presentes nos materiais empregados na fabricação dos tanques de armazenagem, podendo conduzir ao desenvolvimento de reações laterais, como a formação de aldeídos saturados (por exemplo, hexanal, heptanal, ou nonanal) ou de compostos corrosivos. De acordo com estes autores, os investimentos em pesquisas estão trazendo soluções para estas questões, por meio da mistura adequada de óleos (blends), pela utilização de aditivos, pela obtenção de novas variedades e pela escolha da rota tecnológica mais eficiente.

Marques (2007) relata a grande preocupação dos pesquisadores brasileiros no incentivo ao plantio em larga escala do pinhão-manso, pois esta é uma planta ainda selvagem

sobre a qual há pouco conhecimento técnico-científico e ainda não foram encontrados na literatura relatos sobre pesquisas científicas de longa duração relacionadas ao pinhão-manso. Existem apenas estimativas preliminares de produção e de produtividade obtidas pela extrapolação de dados obtidos em plantas isoladas; e a maior parte dos trabalhos científicos são estudos básicos realizados em laboratório ou em casa-de-vegetação sobre temas específicos. O autor destaca outro problema entre os profissionais da área de ciências agrárias que é a ausência de um mercado estruturado para esse produto e o desinteresse das indústrias de extração de óleo no seu processamento em razão das pequenas quantidades de sementes disponíveis. Isso tudo, do ponto de vista do agricultor, sugere uma instabilidade empresarial bastante perigosa, pois o pomar de pinhão-manso é perene e não lhe permite a opção de, no ano seguinte, migrar para outra cultura mais rentável em caso de prejuízo.

Apesar da carência de informações técnicas básicas, a cultura vem sendo implantada, pesquisada e difundida em diferentes regiões do país e do mundo. A história recente do cultivo em larga escala e os esforços em estudos para o conhecimento do pinhão-manso por consequência do apelo energético para a produção de biocombustíveis iniciou-se no ano de 2003 quando a Comissão de Planejamento da Índia decidiu adicionar 20% do biodiesel do óleo de pinhão-manso na mistura com óleo diesel até o ano de 2010 e 30% até 2030 (ÍNDIA, 2003). Depois disso, nos anos subsequentes, a cultura foi introduzida em localidades do Oeste, Leste e Sul da África, Ásia (Índia, China, Japão, Malásia, Filipinas e Tailândia), América do Sul e Central e Bélgica nos últimos onze anos (SINGH et al., 2014).

No Brasil, o interesse na produção do pinhão-manso surgiu com a implantação do Plano Nacional de Produção de Biodiesel, criado em 2004; porém, somente a partir de 2008 o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por meio da Instrução Normativa nº 4, de 14 de janeiro de 2008, autorizou a inscrição, no Registro Nacional de Cultivares, da espécie *Jatropha curcas* L., abrindo caminho para sua exploração comercial no Brasil (ROSCOE, 2008). Andréo-Souza et al. (2010) e Nery et al. (2009) informam que esta oleaginosa é considerada uma cultura potencial para atender a este programa, pois possui potencial de rendimento de grãos e óleo e, em sua fase inicial, permite o cultivo em consórcio com outras culturas de interesse econômico e alimentar. Com a vantagem de ser perene, não exige preparo anual do solo (ARRUDA et al., 2004). Marques (2007) destaca o otimismo encarado pelos pesquisadores brasileiros que consideram que o pinhão-manso poderá se tornar um negócio viável e promissor desde que haja interesse no investimento de recursos consideráveis em pesquisa e desenvolvimento tecnológico, a exemplo do que fez o IAC com o

algodão nos anos de 1930/40, com a cana de açúcar na década de 1950/60 e com a soja nos anos 1960/70.

Com a expansão dos programas energéticos para o suprimento da energia mundial na última década, o pinhão-manso despertou muito interesse em todo o mundo. A atenção mundial para os biocombustíveis, a sustentabilidade ambiental e a utilização e recuperação de terras degradadas para segurança da subsistência com o pinhão-manso, criou um grande interesse nessa espécie (EVERSON; MENGISTU; GUSH, 2013). Inúmeros trabalhos tem sido apresentados com o potencial do pinhão-manso para recuperação de áreas degradadas, sequestro de carbono e pela alta eficiência no uso da água (FRANCIS; EDINGER; BECKER, 2005; ACHTEN et al., 2008; KABIR; HUSSAIN; KIM, 2009; ABHILASH et al., 2010; ACHTEN et al., 2010). Apesar dos seus vários méritos, muitos deles comprovados em centros de pesquisas, o pinhão-manso ainda não pode ser cultivado como uma cultura em larga escala para a produção de biocombustíveis, por se tratar ainda de uma planta semisselvagem em fase inicial de domesticação (SINGH et al., 2014). Entretanto, faz-se necessário a continuação dos estudos nos centros de pesquisas para a validação em condições de campo, como na avaliação das reações da cultura sobre as diferentes práticas de manejo, localidade, e resistência a pragas e doenças, para que assim, possa se efetuar um sólido melhoramento genético. Só após essa etapa, a cultura pode ser recomendada para o cultivo nas propriedades rurais. Essas, medidas tornam-se necessárias para evitar que o pinhão-manso se torne mais uma vez um colapso como biocombustível a nível mundial (KANT; WU, 2011).

2.3 Fatores que afetam o desenvolvimento e a produtividade do pinhão-manso

O plantio de pinhão-manso ao redor do mundo tem sido incentivado pela sua rusticidade e capacidade de desenvolvimento em condições adversas, como em regiões semiáridas e áridas. Essa característica continua sendo muito difundida por alguns autores que consideram o pinhão-manso como uma planta que suporta situações de longas estiagens em regiões de terra de baixa fertilidade e precárias propriedades físicas, com produção satisfatória de óleo (PEIXOTO, 1973). No entanto, tais condições podem afetar significativamente a produtividade e o rendimento de seu óleo.

2.3.1 Exigências climáticas para o cultivo do pinhão-mansó

O pinhão-mansó desenvolve-se bem, tanto nas regiões tropicais secas quanto nas zonas equatoriais úmidas, assim como nos terrenos áridos e pedregosos, podendo suportar longos períodos de secas. É encontrado desde o nível do mar até altitudes de aproximadamente 1000 m; porém, observa-se que a planta se desenvolve melhor entre 200 e 800 metros (SATURNINO et al., 2005). Segundo Arruda et al. (2004), o pinhão-mansó pode se desenvolver sob diversas condições climáticas, tolerando temperaturas médias anuais entre 18 e 28,5°C. A espécie não tolera geadas fortes (temperaturas abaixo de 0°C) mas pode sobreviver a geadas fracas (temperaturas acima de 2°C), perdendo, entretanto todas as folhas, o que provavelmente reduzirá a produção de sementes (SATURNINO et al., 2005). Andrade et al. (2008) confirmaram essa informação ao estudar a tolerância da cultura sob a incidência de geadas, chegando a conclusão de que a cultura do pinhão-mansó é pouco tolerante a geadas, apresentando uma temperatura mínima letal de -3 a -4 °C.

A respeito da radiação solar para o melhor desenvolvimento do pinhão-mansó, Matos et al. (2009) obtiveram sucesso com o cultivo da espécie à sombra ou a pleno sol. As mudas de pinhão-mansó demonstraram relativa variação das características fisiológicas quando submetidas a diferentes irradiâncias. De acordo com esses autores, os resultados sugerem que o pinhão-mansó possui alta capacidade de adaptação a diferentes condições da disponibilidade de luz, o que deve estar relacionado com a aclimação do pinhão-mansó a baixas irradiâncias. Em outro trabalho, Matos et al. (2011) comprovaram a alta plasticidade fenotípica da cultura em resposta à variação da irradiância, destacando porém, o sistema de produção a pleno sol como sendo o mais indicado para a produção de mudas. Liang et al. (2007) apontaram que, sob alta irradiância solar, a taxa fotossintética máxima obtida situa-se entre 9,8 e 14 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Com relação à precipitação anual, Kheira e Atta (2009) afirmam que o pinhão-mansó cresce bem sob baixa pluviosidade, requerendo apenas cerca de 200 mm de chuva para sobreviver, mas que também responde a um maior índice pluviométrico (até 1200 mm por ano), particularmente em ambientes quentes. No Brasil, em condições não irrigadas, a planta cresce em regiões com precipitações pluviométricas variando de 480 a 2380 mm anuais. No entanto, seu melhor desenvolvimento é verificado em regiões que apresentam pluviosidade anual superior a 600 mm, sendo tolerante a longos períodos de estiagem (HENNING, 1996; SEVERINO et al., 2006). Isso significa que, quando a planta é submetida a condições de

baixa disponibilidade hídrica, ela reduz o seu potencial vegetativo e produtivo, não conseguindo portanto, produzir tal quando é suprida corretamente com água e nutrientes, o que não tira a sua grande capacidade de sobrevivência sob condições desfavoráveis de disponibilidade hídrica e de nutrientes do solo (LI et al., 2010).

Segundo Henning (1996) a espécie é tolerante a longos períodos de estiagem com precipitações anuais abaixo de 600 mm, podendo sobreviver com apenas 200 mm anuais de chuva por até três anos. O autor afirma que a planta entra em dormência devido às flutuações climáticas, perdendo as folhas e utilizando água armazenada no caule nos períodos de seca o que conseqüentemente, estimula e favorece o aumento do teor de óleo nas sementes.

Kesava Rao et al. (2012) avaliando a resposta do pinhão-mansão na exigência e uso da água em uma região semiárida da Índia, encontraram produtividades que variaram entre 0,6 a 1,56 Mg ha⁻¹. Os autores confirmaram a tolerância da cultura ao período seco com uma produtividade razoável e concluíram que a distribuição da precipitação é mais importante do que a quantidade de precipitação para a obtenção de produtividades elevadas.

Maes et al. (2009b) estudaram as condições climáticas de cultivo do pinhão-mansão no México e em países da América Central, prováveis centros de origem da cultura; constataram que 95% das espécimes foram encontradas em regiões de climas tropicais (Am, Aw) com pluviosidade média anual acima de 944 mm e uma temperatura média anual entre 19,3 e 27,2°C. Os autores ainda afirmam que a maioria das amostras encontravam-se em regiões de Savana com climas tropicais (Am, Aw) e em climas temperados, sem estação seca e com o verão quente (Cfa).

Embora muitos estudos tenham sido realizados para descobrir sobre as melhores condições climáticas para o desenvolvimento e a produção da cultura; muitos fatores fisiológicos ainda precisam ser estudados. A floração do pinhão-mansão por exemplo é uma questão complexa, pois sabe-se que a floração é induzida por fatores de estresse, como flutuações de temperatura e seca, mas como exatamente isso ocorre ainda não é conhecido. Em climas com uma precipitação distribuída uniformemente e sem grande variação sazonal da temperatura, o pinhão-mansão pode florescer continuamente quando não há outras formas de estresse induzido (FACT, 2010).

2.3.2 Condições e uso do solo

Apesar da cultura apresentar boas características de adaptação e rusticidade às mais variadas condições climáticas e de solo das regiões tropicais e subtropicais, sendo até indicada para áreas com restrições em nutrientes (HELLER, 1996; AUGUSTUS; JAYABALAN; SEILER, 2002), alguns autores discordam que tais condições produtivas possam ser as ideais para a cultura com finalidade comercial. Arruda et al. (2004) relataram que em solos ácidos, com pH abaixo de 4,5, as raízes do pinhão-mansão não se desenvolvem, sendo necessária a realização de calagem com base em análise química do solo. De acordo com Saturnino et al. (2005), a correção do solo, quanto a seu teor de alumínio livre, pela calagem, tem efeito positivo sobre o desenvolvimento do pinhão-mansão. Foidl et al. (1996), por sua vez, citaram a espécie como demandante de grandes quantias de nitrogênio e fósforo, devido à alta produção de biomassa.

A necessidade do uso de fertilizantes também foi relatada por Openshaw (2000), segundo o qual em situações de altos níveis de nitrogênio, ocorre aumento de produtividade. Da mesma forma, Arruda et al. (2004) indicaram solos com altos teores de matéria orgânica, sendo recomendado o uso de adubação verde com leguminosas, pois, de modo geral, estas fornecem altos rendimentos por unidade de área plantada, fixando o nitrogênio atmosférico e transferindo aos solos, por decomposição orgânica, os nutrientes essenciais como fósforo, cálcio ou enxofre, além do nitrogênio.

Com relação ao uso e a classe de solo, tem sido relatado na literatura que o pinhão-mansão tem potencial para a recuperação de terras marginais, sequestrar o CO₂ atmosférico (de superfície e subterrâneo), crescer sob condições salinas e sódicas e consumir menos água (alta produtividade de água) (FRANCIS; EDINGER; BECKER, 2005; ACHTEN et al., 2008; OGUNWOLE et al., 2008; PANDEY et al., 2012; WANI et al., 2012; SINGH et al., 2015). Singh, Singh e Tuli (2013) estudaram o cultivo do pinhão-mansão em solos sódicos da Índia, e constataram que o cultivo dessa cultura reduziu a sodicidade do solo (densidade aparente, pH, condutividade elétrica e porcentagem de sódio trocável) e melhorou a fertilidade do local (atividades de carbono orgânico do solo, biomassa microbiana e enzimas), de acordo com o crescimento e idade da plantação. Apesar de ser pouco exigente em condições climáticas nas regiões tropicais e subtropicais, e adaptado para sobreviver a solos degradados e pouco férteis, o pinhão-mansão deve ser preferencialmente cultivado em solos profundos, bem estruturados, pouco compactados, drenados e preferencialmente, pouco argilosos (ARRUDA et al., 2004).

Marrugo-Negrete et al. (2015) avaliaram a capacidade do pinhão-mansão na fitorremediação de solos contaminados por mercúrio na Colômbia e encontraram resultados bastante promissores. Os autores verificaram o crescimento e o desenvolvimento do pinhão-mansão mesmo em quantidades elevadas de mercúrio (Hg) no solo, onde as maiores concentrações de Hg foram acumuladas nas raízes, seguidas pelas folhas e caules. Estes resultados apresentam a cultura como uma boa opção para a fitorremediação de solos contaminados com mercúrio, pois é fácil de se plantar e manter e contribui para a conservação e recuperação do solo, adaptando-se facilmente a solos erodidos e em locais próximos de áreas de mineração de ouro.

Em relação à textura de solo específica para o desenvolvimento das plantas, Achten et al. (2008) afirma que a planta está bem adaptada a solos de textura arenosa e média, enquanto solos muito argilosos são inadequados para o pinhão-mansão, podendo prejudicar o seu cultivo na ocorrência de algum alagamento ou saturação no solo. Segundo Foidl et al. (1996), a cultura desenvolve-se em todos os solos, exceto em Vertissolos, por preferir solos arenosos. Estes autores indicam que os solos argilosos pesados, como os Vertissolos, são menos adequados devido à sua limitação para o desenvolvimento do sistema radicular do pinhão-mansão devendo, portanto, ser evitado para o cultivo.

Embora o pinhão-mansão se adapte a solos marginais, a planta pode não crescer bem em solos arenosos, caso eles sejam pobres no seu teor nutricional, embora o seu sistema radicular, nesses solos, apresentem um bom potencial para a exploração de nutrientes (VALDES-RODRIGUEZ et al., 2011). Com isso, é necessária cautela quando as plantações de pinhão-mansão estão previstas para o estabelecimento e recuperação em solos pobres, uma vez que essas plantações podem não se desenvolver bem, ou pelo menos, exigir uma adubação adicional.

Tendo em vista o conhecimento inicial sobre a recuperação de solos degradados com o cultivo de pinhão-mansão, outros estudos ao redor do mundo foram realizados com o objetivo de avaliar os impactos das alterações das propriedades biológicas do solo para a recuperação e conservação do solo e da água (KAGAMEBGA et al., 2011; SOP et al., 2011; WANI et al., 2012). Em um outro estudo, Chaudhary et al. (2012) verificou a influência significativa do pinhão-mansão na estrutura da comunidade microbiana em solos da rizosfera, no qual constatou-se que, na rizosfera dos solos onde era cultivado o pinhão-mansão, a quantidade de fungos foi mais elevada do que a de bactérias e actinomicetos as quais contribuíram significativamente para a melhoria do solo, como no caso das hifas fúngicas que promoveram a agregação desses solos.

2.3.3 Irrigação e adubação nitrogenada no pinhão-mansão

As exigências edafoclimáticas do pinhão-mansão permitem seu cultivo em quase todas as regiões do país; no entanto, essa é uma cultura ainda muito pouco explorada no Brasil. Segundo Tewari (2009), a cultura apresenta um potencial de produção de 2 a 3 Mg ha⁻¹ em condições áridas sem uso de irrigação, tornando-se uma planta oleaginosa viável para a obtenção de biodiesel. Em condições de cultivos intensivos, destacando-se uma boa disponibilidade hídrica, estima-se que a produtividade possa atingir cerca de 5 Mg ha⁻¹ (TEWARI, 2009).

O pinhão-mansão, por ser uma cultura tolerante ao efeito da salinidade, exceto na fase inicial de crescimento, pode ser irrigada com água salina, tolerando condutividade elétrica de até 12 dS m⁻¹, valor considerado relativamente alto frente ao tolerado por outras culturas. A cultura demonstrou também a capacidade de translocar sódio do solo, na forma de Na⁺, para a parte aérea da planta (DAGAR et al., 2006).

Fact (2010) indica valores de produtividade de sementes (Figura 2) que variam de 1,5 a 10,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, apresentando como principal problema para as baixas produtividades atuais, a pouca ou nenhuma seleção genética e limitações de água e nutrientes. Quando todas as exigências nutricionais e hídricas da cultura são atendidas, aliadas ao controle sistemático de pragas e doenças, juntamente com a devida seleção genética, a produtividade de sementes ficaria entre 5 e 10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Neste trabalho é apresentada também uma produtividade potencial teórica da cultura que poderia atingir mais de 22 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

Figura 2 - Níveis de produtividades estimadas para a cultura do pinhão-mansão

Fonte: adaptado de FACT (2010).

Entretanto, da expectativa inicial de quatro ou mais toneladas de grãos por hectare, produtividades inferiores a 2,0 Mg ha⁻¹ estão sendo obtidas em diferentes condições edafoclimáticas, principalmente em razão de limitações hídricas, das condições nutricionais do solo ou do ataque de pragas e doenças (EVERSON; MENGISTU; GUSH, 2013; IYAMA et al., 2013; TIKKOO; YADAV; KAUSHIK, 2013; TJEUW; SLINGERLAND; GILLER, 2015). Projeções não realizadas da produtividade de grãos podem ser atribuídas a observações de plantas isoladas, o que acabou desconsiderando a redução no desenvolvimento em plantios (ROCHA et al. 2012). Apesar da complementação hídrica ocasionar em muitos casos o aumento significativo da produtividade de sementes e de óleo extraído, estes não chegaram nem perto de atingir as mais diversas projeções realizadas sobre o potencial comercial máximo da cultura (KHEIRA; ATTA, 2009; KESAVA RAO et al., 2012; TIKKOO; YADAV; KAUSHIK, 2013).

Kheira e Atta (2009) afirmam que não existem dados quantitativos disponíveis e confiáveis sobre a necessidade e a eficiência do uso da água do pinhão-mansão e, em ambientes permanentemente úmidos ou em situações com grande aplicação de água e fertilizante, a planta pode ser induzida a uma produção elevada de biomassa, porém com baixa produção de sementes.

Para a cultura do pinhão-mansão, existem poucas informações a respeito do seu sistema radicular. A maioria das informações disponíveis levam em conta apenas observações de natureza botânica, não se aprofundando no que diz respeito a sua distribuição espacial no solo e muito menos à caracterização das zonas de maior atividade. Trabalhos dessa natureza para o pinhão-mansão ainda são escassos e se limitam a condições específicas do clima e solo da região (ALVES JÚNIOR et al., 2014), além do tipo de sistema de manejo adotado. Devido à pouca quantidade de informações a respeito da distribuição do sistema radicular, reconhece-se que sua caracterização é de extrema importância para a determinação dos parâmetros de manejo da irrigação, como a profundidade efetiva das raízes, que define a camada de solo a ser umedecida, bem como a aplicação de fertilizantes. Sousa e Guerra (2012), avaliando o crescimento inicial de plantas de pinhão-mansão cultivadas em casa de vegetação, observaram efeito significativo sobre a massa de raiz com a variação na aplicação de nitrogênio e quantidade de água. Krishnamurthy et al. (2012) encontraram em um plantio de um ano de idade, na Índia, raízes até a profundidade de 1,4 m; porém, a maioria do sistema radicular se encontrava até a profundidade de 0,3 m. Estes autores salientam a importância deste tipo de distribuição de sistema radicular para a função de controle de erosão, e ainda comentam sobre

a relação inexistente entre este tipo de distribuição e a resistência a seca, característica atribuída a esta planta. Esta última característica é atribuída mais a sua capacidade de controle da perda por evaporação por meio de queda de folhas e dormência, do que à capacidade de extração de água pelo sistema radicular.

A colheita de frutos (casca + sementes) no seu quarto ano de cultivo, extrai valores médios de 21,0; 4,1 e 14,9 g kg⁻¹ de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente (LAVIOLA; DIAS, 2008). Embora a planta de pinhão-mansão seja muito resistente, capaz de manter sua sobrevivência em solos com baixos índices de fertilidade, para se garantir um nível de produtividade satisfatório é necessário a adubação, tanto na implantação da cultura quanto na manutenção ao longo dos anos de produção (LAVIOLA; DIAS, 2008). Na Tabela 2 encontra-se uma recomendação básica para a aplicação de nutrientes durante os quatro primeiros anos de cultivo, levando em consideração um solo com boa fertilidade, capaz de suprir 50% da necessidade da planta. Em um solo com baixa fertilidade, estes valores deveriam ser ampliados (FACT, 2010).

Tabela 2 - Necessidade de nutrientes na cultura do pinhão-mansão durante os quatro primeiros anos de cultivo

Nutriente	1º ano	2º ano	3º ano	4º ano	Total
	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹				
N	23	34	69	103	229
P ₂ O ₅	7	11	21	32	71
K ₂ O	34	50	101	151	336

Fonte: adaptado de FACT (2010).

Apesar de possuir boa adaptabilidade a diferentes condições adversas de solo e disponibilidade hídrica, o pinhão-mansão, como qualquer outra cultura, para proporcionar uma alta produtividade de frutos, necessita solos férteis e com boas condições físicas. E apesar de sobreviver em solos com baixa fertilidade, a correção da fertilidade do solo é decisiva para se obter sucesso e lucratividade com essa cultura, uma vez que a espécie extrai elevada quantidade de nutrientes na colheita e, se não adequadamente adubada, pode levar ao empobrecimento do solo ao longo dos anos de cultivo (LAVIOLA, DIAS, 2008; CHAVES et al., 2009; SCHIAVO et al., 2010; PONCIANO DE DEUS, 2010). O crescimento e a reprodução desta espécie são influenciados pelo seu estado nutricional. Ocorrendo a deficiência nutricional, esta cresce e ramifica menos, implicando em menos frutos, já que os mesmos são produzidos na ponteira dos ramos. O cultivo de pinhão-mansão promove elevada extração de nutrientes do solo, e, portanto, o manejo da adubação da espécie exige atenção (LAVIOLA, DIAS, 2008).

A recomendação de adubação de uma cultura depende da demanda nutricional para o crescimento vegetativo e reprodutivo (LAVIOLA et al., 2006), devendo ser considerada a eficiência de aproveitamento dos fertilizantes aplicados e a fração de nutrientes suprida pelo solo (FRANCO et al., 2008). O suprimento inadequado de nutrientes, seja falta ou excesso, pode provocar restrições ao crescimento das plantas e alterar relações entre biomassa aérea e radicular, bem como promover alterações entre estádios vegetativos e reprodutivos (MARSCHNER, 1995; MENGEL, KIRKBY, 2001; EPSTEIN, BLOOM, 2005; DECHEN, NACHTIGALL, 2006). Silva et al. (2009) relatam que a omissão de macro e micronutrientes em plantas de pinhão-mansó provocam sintomas visuais de deficiência nutricional comuns a outras espécies e que essas deficiências limitam a produção de matéria seca.

O suprimento de N por meio de fertilizantes minerais ou orgânicos associado à complementação hídrica por meio da irrigação, quando aplicados corretamente e aliados com o manejo integrado de pragas e doenças, auxiliam o pleno desenvolvimento vegetativo da cultura além de garantir maiores rendimentos de semente e óleo. A demanda por N é grande durante o crescimento e desenvolvimento das plantas, pois é o nutriente mineral exigido em maior quantidade pelas culturas e, normalmente, proporciona maior resposta em produtividade. A complexidade dos fatores que afetam o seu aproveitamento pelas plantas faz com que o mesmo seja objeto de um grande número de estudos, que visam avaliar principalmente o seu comportamento no solo e a sua relação com a eficiência da adubação (RAIJ, 1991).

O pinhão-mansó apresenta alta taxa de crescimento, sendo o N o nutriente mais requerido para a formação de folhas e frutos (LAVIOLA, DIAS, 2008). O N é essencial para a assimilação do carbono e formação de novos órgãos na planta, tais como gemas florais e frutíferas (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), uma vez que é o componente de aminoácidos, proteínas, enzimas, RNA, DNA, ATP, clorofila e outras moléculas (TAIZ; ZEIGER, 2009). Na ausência de N, a planta tem o crescimento limitado, tornando-se amarelada pela perda da clorofila, o que reflete em amadurecimento precoce, perda de produtividade e qualidade dos frutos (EPSTEIN, BLOOM, 2005).

O manejo do solo pode afetar os processos de consumo de água pelas plantas, modificando a água disponível no perfil. Práticas de fertilização como, por exemplo, a adição de N e P, tem efeito indireto sobre a utilização da água por meio da melhoria da eficiência fisiológica da planta (HATFIELD; SAUER; PRUEGER, 2001).

Apesar de descrita como uma cultura indicada para regiões áridas e semiáridas, tolerante a restrições na disponibilidade de água, o pinhão-mansó tem gerado uma série de

afirmações contraditórias com relação a sua necessidade ou não de irrigação, o que evidencia a necessidade de estudos nas diversas regiões do Brasil para se avaliar a resposta da cultura sob diferentes condições de cultivo e manejos de irrigação. Alguns autores descrevem a espécie com respostas positivas ao uso de irrigação, e principalmente a fatores relacionados à produção e produtividade em cultivos comerciais, possibilitando de três a quatro colheitas por ano (OPENSHAW, 2000). Achten et al. (2008), em trabalho sobre produção e uso de biodiesel de pinhão-mansão, destacam que embora o pinhão-mansão possa ser caracterizado como uma planta tolerante a seca, ainda não se sabe qual a real resposta dessa cultura quando irrigada e qual o comportamento do consumo hídrico quando submetida a diferentes sistemas de produção. Os autores ainda mencionam a necessidade de irrigação para garantir alta produtividade nas regiões áridas e semiáridas.

A quantidade e a qualidade da água de irrigação, embora importantes para o estabelecimento e prática de manejo dos cultivos irrigados, precisam também ser investigados. O cultivo de pinhão-mansão submetido ao estresse hídrico e uso de água salina ou de reúso na irrigação tem sido fonte de estudos recentes na mensuração da adaptabilidade e do desenvolvimento da planta, onde bons resultados tem sido encontrados (SILVA et al. 2010). A resposta do pinhão-mansão quanto à utilização de água residuária tem sido satisfatória e apesar de possuir características de resistência a períodos secos, o estresse hídrico sofrido pela cultura devido ao baixo conteúdo de água no solo tem reduzido drasticamente o seu crescimento vegetativo (SOUSA et al. 2012), peso dos cachos (SILVA et al. 2011) e características fisiológicas como taxa fotossintética, condutância estomática e transpiração das plantas (SANTANA et al. 2015). Sousa et al. (2011) avaliaram o efeito do estresse salino no crescimento e no consumo hídrico no terceiro ano de cultivo do pinhão-mansão e observaram que concentrações acima de $1,6 \text{ dS m}^{-1}$ causaram sensibilidade à cultura, que teve a área foliar e o número de folhas como as variáveis mais afetadas, contradizendo, portanto, a informação relatada por DAGAR et al. (2006) sobre a tolerância da cultura a altos valores de condutividade elétrica da água irrigação.

Embora haja muita especulação sobre a quantidade de água exigida pelas plantas de pinhão-mansão, o consumo hídrico ainda é pouco conhecido. Lena (2013) determinou o consumo hídrico do pinhão-mansão em Piracicaba-SP comparando os métodos de irrigação por gotejamento, pivô central e cultivo não irrigado na fase de formação da cultura, encontrando valores de evapotranspiração acumulada diária de cerca 5 mm dia^{-1} para o tratamento irrigado por pivô central, e de 3 e 2 mm dia^{-1} para os tratamentos irrigados por gotejamento e sem irrigação, respectivamente. O autor ainda ressalta que novos trabalhos precisam ser

elaborados para obter-se um melhor conhecimento da cultura a partir do seu terceiro ano de cultivo. Além disso, trabalhos como o de Albuquerque et al. (2009b) e Guimarães, Santos e Beltrão (2009) apresentam resultados bastante promissores para as práticas de adubação nitrogenada e de irrigação no crescimento inicial da cultura do pinhão-manso, o que mostra que, mesmo sendo uma cultura considerada por muitos como pouco exigente em fertilidade e resistente a seca, pode responder de maneira significativa quando não houver restrições desses fatores.

2.4 Qualidade do óleo vegetal para produção de biocombustíveis

A elevada demanda energética de combustíveis fósseis no planeta estimulou o interesse em fontes renováveis de energia, que reduzam os impactos ambientais atualmente presentes. O uso de combustíveis renováveis, a eficiência energética e proteção ambiental tornaram-se questões importantes nos últimos anos (KUMAR; CHAUBE; JAIN, 2012). A utilização de biodiesel no Brasil e em outros países tem apresentado grande potencial como combustível, contribuindo com a redução dos níveis de poluição ambiental e como fonte estratégica de energia renovável em substituição ao óleo diesel mineral, pois não é tóxico e apresenta uma melhor qualidade de emissões durante o processo de combustão (CORRÊA; ARBILLA, 2006; LÔBO; FERREIRA; CRUZ, 2009).

Segundo Ramos et al. (2003), qualquer matéria-prima oleaginosa pode ser utilizada para a produção de ésteres alquílicos de ácidos graxos (biodiesel), mas a escolha da matéria-prima é um parâmetro importante para a produção de biodiesel dentro das especificações estabelecidas pelos órgãos reguladores. Isso porque alguns óleos vegetais apresentam propriedades que o tornam inadequado para o uso direto em motores do ciclo diesel, como sua alta viscosidade, acidez, formação de gomas devido à oxidação e polimerização durante a armazenagem e queima, contribuindo para a diminuição da lubricidade do óleo e formação de depósitos de carbono (FUKUDA; KONDO; NODA, 2001). Sendo necessário adequar seu uso por meio de algum processo químico para posterior utilização em motores, que no caso dão origem ao biocombustível.

Como há uma grande variedade de matérias-primas existentes para a produção de biodiesel, é plausível dizer que somente com o conhecimento pleno das propriedades que determinam os padrões de qualidade do biodiesel é que será possível estabelecer os parâmetros de controle que garantirão o sucesso de sua incorporação na matriz energética

nacional (RAMOS et al., 2003). Neste sentido, o Governo Federal, por meio do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), publicou no DOU de 26/12/2006, Seção 1, Página 140, a Instrução Normativa nº 49, a qual estabelece o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade dos Óleos Vegetais Refinados. Nesta instrução estão estabelecidos os padrões de identidade que caracterizam os óleos vegetais, quais sejam: índice de acidez, índice de peróxido, densidade relativa, índice de refração, índice de iodo, cor e estabilidade oxidativa a 110° C.

2.4.1 Perfil composicional de ácidos graxos

Os óleos utilizados como matérias-primas para a produção de biodiesel são obtidos de diversas plantas oleaginosas. O país devido a sua grande extensão de terras de diferentes classes de solo e clima, disponibiliza inúmeras espécies de oleaginosas que se diferenciam principalmente pela composição em ácidos graxos. Os ácidos graxos presentes nos óleos vegetais são ácidos carboxílicos, constituídos por hidrogênio e carbono em sua cadeia molecular. Segundo Redá e Carneiro (2007) os ácidos graxos se diferem a partir do comprimento de sua cadeia carbônica, do número, orientação e da posição de insaturações presentes na cadeia e da presença de grupamentos químicos.

Os ácidos graxos são classificados como saturados, mono e poli-insaturados, dependendo do número de duplas ligações na sua cadeia de carbonos (Figura 3). Os saturados não contêm dupla ligação entre os átomos de carbono. Os monoinsaturados contêm uma única dupla ligação e os poli-insaturados (linolênico, linoleico e araquidônico) com duas ou mais duplas ligações.

Figura 3 - Tipos de ácidos graxos

Fonte: www.azeite.com.br

O conhecimento da composição em ácidos graxos do óleo vegetal é muito importante, porque muitas das propriedades do biodiesel têm origem nas estruturas dos ácidos graxos originais. As características do biodiesel que são determinadas pela composição dos ésteres de ácidos graxos incluem qualidade da ignição, calor de combustão, escoamento a frio, estabilidade oxidativa, viscosidade e lubricidade (CAMARGOS, 2005).

A análise da composição dos ácidos graxos constitui o primeiro passo para a avaliação da qualidade do óleo bruto e/ou seus produtos de transformação. Para determinar a composição, em ácidos graxos, métodos cromatográficos (cromatografia líquida e gasosa) e ressonância magnética nuclear de hidrogênio podem ser utilizados (WUST, 2004).

A cromatografia é um método físico-químico de separação. A técnica está fundamentada na migração diferencial dos componentes de uma mistura, que ocorre devido a diferentes interações, entre duas fases imiscíveis, a fase móvel e a fase estacionária. A grande variedade de combinações entre fases móveis e estacionárias a torna uma técnica extremamente versátil e de grande aplicação (DEGANI; CASS; VIEIRA, 1998). Ainda de acordo com Degani, Cass e Vieira (1998), a cromatografia gasosa é uma das técnicas analíticas mais utilizadas. Além de possuir um alto poder de resolução, é muito atrativa devido à possibilidade de detecção em escala de nano a picogramas (10^{-9} - 10^{-12} g). A grande limitação deste método é a necessidade de que a amostra seja volátil ou estável termicamente, embora amostras não voláteis ou instáveis possam ser derivadas quimicamente.

A ressonância magnética nuclear (RMN) é um método espectroscópico de ^1H que assim como as demais técnicas espectroscópicas, são baseadas no princípio de que as moléculas e átomos podem interagir de diferentes formas com a radiação eletromagnética, revelando informações estruturais e termodinâmicas de forma qualitativa e/ou quantitativa, dependendo da intensidade e do comprimento de onda da radiação utilizada. Os métodos espectroscópicos possibilitam análises rápidas e diretas, podendo detectar vários compostos simultaneamente (IBAÑEZ; CIFUENTES, 2001), além de permitir uma boa reprodutibilidade na detecção dos componentes (BELTON et al., 1996). Embora a técnica possua as vantagens na rapidez e na confiabilidade na determinação quantitativa dos compostos solúveis em uma mistura, o aparelho de RMN ^1H apresenta um limite de detecção na ordem de partes por milhão o que pode não ser possível à identificação de compostos com baixíssima quantidade nas amostras (BELTON et al., 1996). O que pode se tornar uma vantagem quando a finalidade é identificar apenas os componentes majoritários da amostra e os componentes traços podem ser desprezados.

Os ácidos graxos presentes nos óleos e gorduras são constituídos, geralmente, por ácidos carboxílicos que contêm de 4 a 30 átomos de carbono e podem ser saturados ou insaturados. A distinção dos óleos com base no seu grau de insaturação, no tamanho das moléculas e pela presença ou não de grupos químicos reflete diretamente nas qualidades do biocombustível produzido (WUST, 2004).

Longa cadeia de ácidos graxos e pequeno número de insaturações (duplas ligações) ocasionam maior número de cetano e lubricidade do combustível. Entretanto, um aumento no número de cetano ocasiona também um aumento no ponto de névoa e de entupimento (maior sensibilidade aos climas frios). As moléculas são menos estáveis quimicamente com número de insaturações elevado e isso pode provocar inconvenientes devido a oxidações, degradações e polimerizações do combustível, se inadequadamente armazenado ou transportado (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2008).

Dessa forma, tanto os ésteres alquílicos de ácidos graxos saturados (láurico, palmítico, esteárico) como os de poli-insaturados (linoleico, linolênico) possuem alguns inconvenientes, uma vez que são pouco resistentes à oxidação e o número de cetano é geralmente baixo. Porém, são mais facilmente degradados desaparecendo do meio ambiente em períodos de tempo mais curtos, sendo mais vantajosos do ponto de vista ambiental (GOMES, 2009).

Os óleos saturados do tipo esteárico ou palmítico são pouco fluídos (grande viscosidade), mas são resistentes à oxidação. Encontram-se normalmente no estado sólido à temperatura ambiente. Geralmente, apresentam um índice de cetano excelente. Porém sua alta

viscosidade, aliados à resistência à oxidação dificultam a sua degradação, remoção e limpeza (GOMES, 2009).

De uma forma geral, um biodiesel com predominância de ácidos graxos combinados monoinsaturados (oleico, ricinoleico) são os que apresentam os melhores resultados (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2008).

A qualidade do óleo é uma função do seu perfil de ácidos graxos. Óleos com alto teor de ácido oleico são adequados para uso alimentar, devido à sua longa vida de prateleira, enquanto que uma quantidade de ácido linoleico inferior a 3% é preferível para a estabilidade do óleo e para a produção de biodiesel é desejável um baixo conteúdo de ácidos graxos saturados (RAJU; EZRADANAM, 2002). Sementes com alta razão de ácido oleico/linoleico podem indicar uma maior estabilidade e vida útil mais longa. (KAUSHIK; BHARDWAJ, 2013).

Ao lado de produção de sementes, o teor de óleo e a composição de ácidos graxos são os dois principais parâmetros bioquímicos do pinhão-mansão, que são muito importantes para a seleção de sementes com um alto rendimento e com alto teor de ácido graxo poli-insaturado (KAUSHIK; BHARDWAJ, 2013). A composição de ácidos graxos do pinhão-mansão é classificado como um tipo de ácido linoleico ou oleico, que são ácidos graxos insaturados utilizados como matéria-prima para a produção de biodiesel (MITTELBACH; REMSCHMIDT, 2004; ONG et al 2013). Apesar da importância desta espécie, há poucos trabalhos na literatura que mostram a influência no manejo do pinhão-mansão na composição dos ácidos graxos presentes no óleo da semente.

A correta disponibilidade da água de irrigação para as plantas de pinhão-mansão evitando a sua falta ou o seu uso excessivo, pode ocasionar em um óleo com melhores características para a produção de biodiesel quanto ao seu perfil composicional. Kheira e Atta (2009), ao avaliarem as características do óleo de pinhão-mansão, encontraram nas plantas manejadas com 100% da evapotranspiração potencial (ETp), os melhores valores da razão de ácido oleico/linoleico em comparação aos tratamentos irrigados com déficit e com excesso. O uso da fertilização nitrogenada além de auxiliar no aumento da produtividade de grãos de pinhão-mansão se correlaciona positivamente no efeito de alguns ácidos graxos do seu óleo, tendo para o ácido oleico o seu maior efeito (AKBARIAN; MODAFEBEHZADI; BAGHERIPOUR, 2012).

2.4.2 Índices de qualidade

Algumas características são indicativas da qualidade de um produto. No que se refere aos óleos vegetais, parâmetros físicos e químicos são analisados e utilizados para garantir a qualidade dos mesmos para a produção de biodiesel, pois, é por meio destes resultados que se estabelece a técnica que será utilizada na sua produção, e se há ou não a necessidade do uso de um pré-tratamento da matéria-prima (MELO, 2012).

Desta forma, são determinados os índices de acidez, iodo, peróxido e refração, além da densidade relativa, estabilidade oxidativa, entre outros. Estes parâmetros de qualidade assim como outros não citados, podem ser determinados por métodos de referência como os estabelecidos pela AOCS (American Oil Chemists' Society) ou pela Ethiopian Standard os quais têm sido bastante empregados por muitos laboratórios e indústrias.

O teor de acidez é uma das principais características relacionadas com a qualidade da matéria-prima. Vários fatores podem influenciar a acidez de um óleo vegetal, mas o principal é o tratamento dado ainda às sementes durante a colheita e armazenamento (PEREIRA, 2007). Está diretamente relacionado com a quantidade de ácidos graxos livres presentes no material lipídico originados da hidrólise dos triacilglicerídeos nas condições de conservação e processamento dos óleos vegetais (MORETTO, FETT, 1998).

A alta acidez do biodiesel pode levar à sua degradação mais rápida levando à formação de precipitados, provocando o entupimento do filtro de combustível ou a diminuição de sua pressão, além de acelerar a corrosão de partes metálicas do motor e dos sistemas de injeção (FLUMIGNAN et al., 2012; VISENTAINER; SANTOS JÚNIOR, 2013). O monitoramento do índice de acidez ou número de acidez no biodiesel é de grande importância também durante a estocagem, na qual a alteração nos valores de acidez pode significar a presença de água e/ou degradação oxidativa (FLUMIGNAN et al., 2012).

O índice de iodo é uma medida da insaturação total dentro de uma mistura de ácido graxo. Além de indicar o grau quantitativo de insaturações no biodiesel ou óleo vegetal/animal, o índice de iodo é dependente do tipo de matriz utilizada. O número de insaturações se trata de um importante componente na caracterização do óleo vegetal e consequentemente do biodiesel que será produzido, pois além de apresentar efeito nos valores de densidade e de viscosidade dos biodieseis, também é de grande importância na estabilidade oxidativa dos biodieseis (FLUMIGNAN et al., 2012).

O número de iodo revela o número de insaturações de uma determinada amostra e esse valor constitui um dos parâmetros de identidade dos óleos vegetais, pois cada dupla ligação de um ácido graxo pode incorporar dois átomos de halogênio. Por essa razão, quanto maior a insaturação de um ácido graxo, maior será a sua capacidade de absorção de iodo e, consequentemente, maior será o índice de iodo (MORETTO; FETT, 1998).

Este método consiste no tratamento da amostra de óleo vegetal e animal ou biodiesel com iodo em excesso, que reage com as duplas ligações. O iodo não reagido é, então, titulado com tiosulfato de sódio e o resultado expresso como gramas de iodo que reagem com as insaturações em 100 g de amostra (FLUMIGNAN et al., 2012). Segundo Ramos et al. (2009), o índice de iodo de um óleo vegetal ou de uma gordura animal é quase idêntico ao do metil-éster correspondente.

O índice de peróxido determina todas as substâncias que oxidam o iodeto de potássio a iodo. Estas substâncias são consideradas como sendo peróxidos ou produtos similares provenientes da oxidação das gorduras. Os peróxidos são produtos primários da oxidação de lipídeos (AOCS, 2003). É um indicador muito sensível no estágio inicial da oxidação, e sua presença é indício de que a deterioração do sabor e odor, em função de sua instabilidade, está por acontecer. Quando sua concentração atinge certo nível, mudanças complexas ocorrem, formando compostos de baixo peso molecular, oriundos de sua degradação (REGITANO-D'ARCE, 2006).

O índice de peróxido é o mais usado para indicar o grau de oxidação. O valor de peróxido é a medida do teor de oxigênio reativo expresso em termos de milequivalentes de oxigênio por 1.000 g de óleo ou como milimoles de peróxido por quilo de molécula graxa (1 milimol = 2 milequivalentes) (AOCS, 2003). As substâncias quantificadas são geralmente peróxidos e outros produtos similares, resultantes da oxidação lipídica. A aplicação do índice de peróxido se dá em todo o tipo de gordura ou óleo (AOCS, 2003).

Durante essa análise, a amostra com solvente é adicionada em uma solução de iodeto de potássio saturada. Desta forma, os íons de iodo reagem com os peróxidos produzindo I_2 . Como indicador, é adicionado amido que na presença de I_2 se colore de azul. Ao titular-se a solução com tiosulfato de sódio ocorrerá a oxidação a tetrionato de sódio e o iodo é reduzido a I^- , causando perda na cor azulada, logo a quantidade de tiosulfato consumida é proporcional à quantidade de íons de iodeto presentes e indiretamente, de peróxido (BACCAN et al., 1985).

O índice de refração de uma substância é a relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz na substância testada. É um parâmetro físico importante para garantir a

qualidade dos óleos. Ele varia na razão inversa da temperatura e eleva-se com o aumento do comprimento da cadeia e também com o grau de insaturação dos ácidos graxos constituintes dos triglicerídeos (PEREIRA, 2007). Por depender fortemente da temperatura as suas medidas devem ser feitas em temperatura constante. O índice de refração de óleos e gorduras é muito usado como critério de qualidade e identidade pois, quando referente a um óleo, este índice aumenta com o índice de iodo e pode ser usado no controle de processos de hidrogenação de óleos insaturados (CECCHI, 2003).

A densidade do biodiesel está diretamente ligada com a estrutura molecular das suas moléculas. Quanto maior o comprimento da cadeia carbônica do alquiléster, maior será a densidade, no entanto, este valor decrescerá quanto maior forem o número de insaturações presentes na molécula. A presença de impurezas também poderá influenciar na densidade do biodiesel como, por exemplo, o álcool ou substâncias adulterantes (LÔBO; FERREIRA; CRUZ, 2009). Como é característica de cada substância, a determinação da densidade em óleos é um parâmetro importante para verificar se houve adulteração com a adição de água ou substâncias dissolvidas dentro das amostras (presença de contaminantes).

A estabilidade à oxidação ou estabilidade oxidativa reflete o tempo que o biodiesel ou óleo vegetal leva para se degradar formando compostos orgânicos voláteis. A estabilidade oxidativa do biodiesel está diretamente relacionada com o grau de insaturação dos alquíésteres presentes, como também com a posição das duplas ligações na cadeia carbônica (VISENTAINER; SANTOS JÚNIOR, 2013). Quanto maior o número de insaturações (maior índice de iodo), mais susceptível está a molécula à degradação tanto térmica quanto oxidativa, formando produtos insolúveis que ocasionam formação de depósitos e entupimento do sistema de injeção de combustível do motor (FLUMIGNAN et al., 2012).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

A área experimental, com a cultura e os lisímetros já instalados, está situada no Departamento de Engenharia de Biossistemas, na Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ – USP), em Piracicaba-SP (latitude 22°42’30”S, longitude 47°30’00” e altitude de 546 m). Além da área cultivada com pinhão-manso, a área experimental conta ainda com um sistema de irrigação por pivô central; barracão para máquinas, equipamentos e salas de apoio; sistema de bombeamento de água do rio Piracicaba para um açude; casa de bombas para irrigação localizada e pivô central; e painel controlador da irrigação localizada (Figura 4).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Cwa, denominado tropical de altitude, sendo caracterizado por grandes volumes de chuvas no verão e por estiagem no inverno (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). A precipitação média anual é de 1.328 mm e a temperatura média anual de 21,6°C, sendo a média em julho, o mês mais frio, com 17°C e a média em janeiro e fevereiro, como meses mais quentes, com 25°C (CEPAGRI, 2013).

O preparo inicial da área experimental junto com o transplântio das mudas ocorreu em meados de dezembro de 2011, com as plantas dispostas no espaçamento de 3 m entre plantas e 4 m entre linhas (12 m^2 de área para cada uma), totalizando $833 \text{ plantas ha}^{-1}$.

A área experimental com pinhão-manso foi dividida de acordo com o manejo hídrico utilizado, sendo composta pelos tratamentos irrigados por pivô central e não irrigado (sequeiro). Na Figura 4 encontra-se o croqui da área experimental, onde pode ser observada a disposição dos sistemas de irrigação no campo e a área total utilizada para cada tratamento. A área experimental localizou-se próximo da estação meteorológica da Fazenda Areão da ESALQ/USP (Figura 4), o que contribuiu para a determinação de variáveis meteorológicas in loco utilizados conjuntamente com os dados lisimétricos para a realização do manejo de irrigação. A estação meteorológica dispõe de um datalogger para leitura dos sensores de temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar global, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, saldo de radiação e chuva.

Figura 4 - Croqui da área experimental contendo as áreas de cada manejo hídrico e a estação meteorológica

O sistema de pivô central é composto de três torres sobre rodas com 183 m de raio e capaz de irrigar uma área de 10,5 há com uma vazão real de $90 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Quando acionado em sua velocidade máxima (com relê ligado à 100% no painel controlador), aplica de acordo com as especificações do fabricante, uma lâmina bruta de 4,4 mm em toda a área após cinco horas e seis minutos (tempo total para uma volta inteira). Após a instalação do sistema de irrigação, testes de avaliação foram realizados e foram verificados os seguintes parâmetros: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) de 82,1%; Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) de 64,2% e eficiência de aplicação (Ea) de 77,7%.

3.2 Descrição dos tratamentos e delineamento experimental

A área irrigada por pivô central e sem irrigação tiveram como tratamentos, diferentes doses de adubação nitrogenada a base de ureia, utilizando 150%; 100%; 50% e o tratamento controle com 0% da recomendação de adubação para a cultura (FACT, 2010). Os tratamentos aplicados na área irrigada por pivô central foram denominados como P1; P2; P3 e P4, respectivamente para 150, 100, 50 e 0% da adubação nitrogenada. Enquanto na área sem irrigação os tratamentos aplicados foram denominados de acordo com os tratamentos citados respectivamente como S1; S2; S3 e S4. A área irrigada por pivô central recebeu uma lâmina

de irrigação uniforme equivalente a 100% da evapotranspiração da cultura que foi determinada por meio de dois lisímetros de pesagem localizados ao lado da área em estudo.

O delineamento experimental de cada área foi em blocos casualizados, sendo dividida em 4 blocos por área, o que implicou em 16 unidades experimentais para cada área, totalizando, portanto, 32 unidades experimentais (Figura 5). A análise conjunta dos dados, entretanto, foi realizada como análise de grupos de experimentos (BANZATTO; KRONKA, 2008). A instalação de cada tratamento foi determinada por linha de plantio, onde realizou-se previamente o sorteio dos tratamentos dentro de cada bloco. O esquema da análise de variância para o experimento realizado, com análise agrupada dos dois experimentos, é expresso na Tabela 3.

Figura 5 - Esquema da distribuição dos tratamentos na área sem irrigação

As aplicações dos tratamentos, assim como o início dos estudos na área experimental, se iniciaram após o final do primeiro ciclo produtivo da cultura (final do segundo ciclo de cultivo), em agosto de 2013. Os estudos foram realizados durante o terceiro e quarto ano de cultivo da cultura, o que correspondeu aos anos agrícolas de 2013/2014 e 2014/2015, com o início do ciclo a partir do mês de agosto, época na qual todos os frutos já foram colhidos e por apresentar um período característico, marcado pela época da poda de renovação ou limpeza (agosto) e encerrando-se no mês julho, com o final da queda das folhas (final do período de senescência).

Tabela 3 - Esquema da análise de variância

Fontes de Variação	Grau de Liberdade
Blocos dentro de Irrigação	6
Irrigação (I)	1
Doses de N (N)	3
Interação I x N	3
Resíduo Médio	18
Total	31

3.3 Caracterização do solo

As análises físico-hídrico do solo foram realizadas no Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ-USP e no Laboratório PiraSolos em Piracicaba-SP.

O solo da área experimental foi classificado como NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico (EMBRAPA, 2013), apresentando para todas as áreas utilizadas textura argilosa nas camadas de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m e muito argilosa na camada 0,4-0,6 m de acordo com os critérios do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013).

A caracterização da análise granulométrica do solo da área experimental foi resultado da média de três repetições de cada área experimental nas camadas de 0-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m que se enquadram dentro da camada de maior influência do sistema radicular da cultura do pinhão-mansão (ALVES JÚNIOR et al., 2014). Na realização da referida análise foi adotada a metodologia de Bouyoucos (Tabela 4), conforme as recomendações de Donagema et al. (2011). A caracterização e elaboração das curvas de retenção características do solo para a área experimental foram descritos por Flumignan (2012).

Tabela 4 - Composição textural do solo da área experimental

Área de cultivo	Camada (m)	Argila	Silte	Areia	Classe Textural
		-----g kg ⁻¹ -----			
Pivô Central	0-0,2	464	296	240	Argilosa
	0,2-0,4	498	292	210	Argilosa
	0,4-0,6	576	264	160	Muito Argilosa
Sequeiro	0-0,2	505	245	250	Argilosa
	0,2-0,4	502	248	250	Argilosa
	0,4-0,6	621	179	200	Muito Argilosa

A partir da caracterização inicial do solo feita por Flumignan (2012), e com outras análises posteriores para comparação, adotou-se para a área sem irrigação os valores da capacidade de campo (cc) e o ponto de murchamento permanente (pmp) para as camadas de 0-0,40 m e 0,40-0,80 m respectivamente de 0,42 e 0,32 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; e 0,43 e 0,33 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. A densidade do solo representativa da área sem irrigação foram de 1,53; 1,45; 1,41 e 1,27 g cm^{-3} para as camadas de 0-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m e 0,60-0,80 m, respectivamente. Já para o solo da área irrigada por pivô central, a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente para as camadas de 0-0,40 m e 0,40-0,80 m foram de 0,44 e 0,31; e 0,46 e 0,35, respectivamente. A densidade do solo representativa da área irrigada foram de 1,55; 1,46; 1,41 e 1,31 g cm^{-3} respectivamente para as camadas de 0-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m e 0,60-0,80 m.

A caracterização química inicial do solo foi realizada mediante análise de amostras compostas coletadas nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade nas duas áreas de influência do cultivo, antes da aplicação dos tratamentos. Para as condições químicas encontradas nas análises de solo, não foi necessário à aplicação de calagem, pelos valores da saturação por bases estarem acima de 60%. Na Tabela 5 estão apresentados os resultados da análise de fertilidade.

Tabela 5 - Análise química da área experimental

Área de manejo	Camada (m)	pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³	P -mg dm ⁻³	S (SO ₄) -mg dm ⁻³	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al -----mmol _c dm ⁻³ -----	Al ³⁺	Sat. Bases V%
Pivô	0-0,2	6,0	18	10	26	2,5	55	18	20	0	79
Central	0,2-0,4	5,8	9	2	32	1,2	47	21	20	0	78
Sequeiro	0-0,2	5,5	18	18	22	1,3	49	13	25	0	72
	0,2-0,4	5,5	11	4	26	1,0	44	12	25	0	70

3.4 Caracterização da água de irrigação

A água utilizada no experimento foi proveniente do sistema do reservatório de água localizado dentro da Fazenda Areão e usada exclusivamente para fornecimento de água para as culturas localizadas na área experimental. Para saber se o conteúdo físico-químico da água utilizada na irrigação poderia influenciar na disposição dos nutrientes fornecidos para a cultura por meio da adubação, foi realizada uma análise da qualidade da água para verificar as

características físico-químicas presentes (Tabela 6). A análise físico-química da água de irrigação foi realizada pelo Laboratório de Ecologia Aplicada, localizada no Departamento de Ciências Florestais na ESALQ/USP.

Tabela 6 - Resultados da análise físico-química da água utilizada para irrigação

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Resultado	VMP ⁽¹⁾
Acidez	pH	-	6,8	6,0-9,5
Acidez (CaCO ₃)	-	mg L ⁻¹ (CaCO ₃)	6,3	-
Condutividade elétrica	CE _a	dS.m ⁻¹ (25°C)	0,1	1,5
Alcalinidade Carbonato	CO ₃ ⁼	mg L ⁻¹	0	-
Alcalinidade Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	15,8	-
Alcalinidade Total	2CO ₃ ²⁻ + HCO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	15,8	500
Cálcio	Ca ⁺⁺	mg L ⁻¹	1,7	75
Magnésio	Mg ⁺⁺	mg L ⁻¹	1,0	150
Sulfato	SO ₄ ⁼	mg L ⁻¹	11,9	250
Nitrogênio - Nitrato	N - NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	0,8	10
Nitrogênio - Amônio	N - NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	0,1	1,5
Fósforo - Fosfato	P - PO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	0,06	0,06
Potássio	K ⁺	mg L ⁻¹	2,3	-
Sódio	Na ⁺	mg L ⁻¹	6,0	-
Dureza Total (CaCO ₃)	-	mg L ⁻¹	12,8	500

⁽¹⁾ Valores máximos permitidos.

De acordo com a classificação da University of Califórnia Committee of Consultantes (UCCC, 1974), a água utilizada para irrigação de foi classificada como C1S2, ou seja, água com baixo risco de salinidade o que é considerada adequada ao uso para a irrigação. O risco de sodicidade foi considerado praticamente nulo devido ao baixo valor da razão de adsorção de sódio corrigida, calculado com os resultados da análise, assim como os baixos teores de sódio apresentados na análise que garantem a ausência de toxicidade desse elemento.

3.5 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação com a quantificação da lâmina de irrigação a ser aplicada e a determinação da evapotranspiração nos tratamentos foi realizada pela metodologia da lisimetria de pesagem direta descrita por Lena (2013) e também realizada na mesma área experimental. Essa metodologia consiste na utilização de tanques de metal preenchidos com

solo da própria área experimental e que são apoiados sobre um sistema de pesagem de alta precisão. Basicamente o sistema de lisimetria proporciona a medição das entradas e saídas de água do sistema. Foram utilizados dois lisímetros por área, totalizando, portanto, quatro lisímetros no experimento que foram previamente dimensionados para que sua superfície respeitasse o espaçamento das plantas e o pleno desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea da cultura. Cada lisímetro é cilíndrico e apresenta 3,91 m de diâmetro interno (12 m² de área) por 1,3 m de profundidade útil do solo. O sistema ainda apresenta um sistema de drenagem que é composto por reservatórios de armazenamento de água constituídos de tubos de PVC, os quais possibilitam o armazenamento da água drenada através do perfil do solo. O detalhamento da calibração e das instalações dos lisímetros utilizados na área experimental é descrita por Flumignan (2012). Na Figura 6 é apresentado um esquema sobre o balanço de água no solo feito pelos lisímetros.

Figura 6 - Balanço hídrico do sistema de lisímetro de pesagem com as entradas e saídas de água do sistema, sendo ET a evapotranspiração, E a evaporação, T a transpiração, I a irrigação, R o escoamento superficial e P a precipitação. Fonte: Lena (2013)

A determinação da quantidade de água necessária para repor a evapotranspiração foi calculada semanalmente para a área irrigada por pivô central. A irrigação foi realizada de maneira manual, ajustando o percentímetro da velocidade de deslocamento circular (caminhamento) do pivô a cada irrigação, de forma que fosse aplicada a lâmina de água desejada. Um dia anterior à irrigação, os dados dos lisímetros foram coletados e analisados, sendo possível verificar a lâmina de água que foi necessária para repor na semana, colocando o armazenamento de água no solo na condição de capacidade de campo para os tratamentos

irrigados. A determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) para o posterior manejo da lâmina a ser reposta pela irrigação foi determinada pela contabilidade das entradas, saídas e armazenamento de água nos lisímetros (LENA, 2013).

A profundidade efetiva do sistema radicular considerada foi de 50 cm, baseado principalmente nos trabalhos de Krishnamurthy et al. (2012) e Alves Júnior et al. (2014) que apresentam que o sistema é capaz de atingir profundidades maiores que 1 metro; porém, apresenta a maioria das raízes, principalmente as responsáveis pela absorção de água, nas camadas mais superficiais. A capacidade de água disponível (CAD) foi determinada a partir dos valores de umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente e na capacidade de campo obtidas para cada área de manejo hídrico adotado.

Devido à alta escassez hídrica ocasionada pela baixa pluviosidade ocorrida durante o ano agrícola de 2014 em toda a região Sudeste e no município de Piracicaba-SP e com a drástica redução do nível do reservatório localizado na Fazenda Areão, as práticas de irrigação e o seu manejo foram realizados apenas no primeiro ciclo de avaliação (3º ano de cultivo) sendo suspensas no ciclo seguinte, devido a sua impossibilidade pelo baixo nível do reservatório no local e para que o mesmo pudesse se reestabelecer em um menor período de tempo. Com o cessamento das irrigações na área de cultivo sob o pivô central a partir do segundo ciclo de avaliação, todas as coletas e análises realizadas nos tratamentos de adubação localizados na área antes irrigada por pivô central passaram a ser consideradas como medições dos tratamentos em uma área com histórico de irrigação, visto que, desde a sua implantação o local fora irrigado tendo o seu manejo adequado de irrigação de forma a suplementar o déficit hídrico nos períodos mais secos do ano, onde o regime de chuvas não era capaz de suprir a demanda evapotranspirométrica da cultura em determinado período.

Mesmo a localização da área experimental irrigada estando próxima da região dos dois lisímetros de paisagem, de forma que os tratamentos recebidos com as diferentes doses de irrigação apresentassem condições de textura do solo e relevo semelhantes ao das plantas localizadas nos dois lisímetros, não foi realizado um manejo quanto à quantificação das lâminas de água requeridas por cada tratamento, visto que, com as diferentes doses de adubação nitrogenada o crescimento e consequentemente a evapotranspiração das parcelas irrigadas são diferentes. Assumiu-se para este estudo, um manejo da irrigação a partir dos dados coletados de plantas inseridas nos lisímetros e que estavam em plenas condições de desenvolvimento e sem restrição de nutrientes, onde a prática de irrigação serviu-se apenas para complementar a falta de água nos períodos mais secos do ano que é ocasionado pela diminuição das chuvas, comparando com uma área onde não se fez o uso da irrigação.

Possibilidades como a variação da lâmina de irrigação no equipamento de pivô central com a substituição de diferentes tipos de bocais com as mais variadas vazões e dispondo os tratamentos em linhas curvilíneas no sentido de rotação do pivô chegaram a ser pensadas; entretanto, foram rapidamente descartadas, já que esse sistema de irrigação comporta uma área total de 10,5 ha na Fazenda Areão, e além de atender a área cultivada por pinhão-manso de 1,0 ha que corresponde apenas a 9,5% da área atendida pelo pivô central, o mesmo equipamento atende à necessidade hídrica de outras áreas de cultivo, incluindo áreas de experimentos de outros projetos de pesquisa.

3.6 Monitoramento da umidade do solo

O monitoramento da umidade do solo foi realizado com o auxílio de sondas de capacitância da marca Sentek[®], modelo Diviner 2000, no qual estimou a umidade do solo por meio de campos elétricos de alta frequência. Esta contém uma haste que, ao ser inserida em tubos de acesso previamente instalados no solo, possibilita coletar a porcentagem de água no perfil de solo desejado. Para que isso ocorresse, foi necessário antes fazer uma curva de calibração na área experimental na época de implantação da cultura, para que assim, de posse da equação de calibração do solo característico da Fazenda Areão, todas as leituras do equipamento transmitidas em unidade de frequência pudessem ser convertidas em umidade volumétrica do solo. Com a implantação da cultura em 2011, foi instalado na área experimental um tubo de acesso para cada lisímetro de pesagem e outros 10 situados nas suas plantas de bordadura (distribuídos ao redor de cada lisímetro), com a finalidade de comparar os perfis de umidade dentro e fora dos lisímetros.

Durante o segundo ciclo de avaliação da cultura (4º ano) foram instalados um tubo de acesso por tratamento na área irrigada por pivô central e sem irrigação, de forma a comparar os perfis de umidade localizados nas plantas com diferentes níveis de adubação nitrogenada com as plantas que receberam a adubação plena situados dentro e fora dos lisímetros, assim como as plantas dos tratamentos P2 e S2 que receberam 100% de N. Esse monitoramento foi realizado para verificar se houve ou não alguma mudança drástica na variação de umidade dos diferentes tratamentos por adubação nitrogenada quando comparada com as demais plantas da área experimental.

O monitoramento da umidade do solo dentro e fora dos lisímetros foi realizado em períodos pontuais dentro dos dois ciclos de avaliação do referido estudo e dentro de um

período específico no segundo ciclo de avaliação para os tratamentos adubados. Os tubos de acesso foram instalados de acordo com cada ponto de monitoramento entre a profundidade de 80-110 cm, onde nesse estudo, foi avaliado para todos os tratamentos e pontos de monitoramento de umidade o perfil de umidade correspondente até a profundidade de 80 cm, que representa a camada de maior influência do sistema radicular da cultura do pinhão-mansão (ALVES JÚNIOR et al., 2014).

3.7 Manejo da cultura

Ao longo da condução do experimento, foram realizadas práticas de manejo cultural, de forma a proporcionar as melhores condições para o desenvolvimento das plantas. Dentre essas práticas se destacaram o controle de insetos, de doenças e de plantas invasoras. O controle de pragas se concentrou no combate da cigarrinha verde (*Empoasca* spp.); ácaro branco (*Polyphagotarsonemus latus* Banks) e percevejo (*Pachycoris* sp.), enquanto o controle de doenças foi voltado no combate ao Oídio (*Oidium* sp.) e ferrugem (*Phakospora arthuriana* Buriticá & Hennen). As aplicações dos produtos químicos para o controle de pragas e doenças foram realizadas sempre quando diagnosticada a presença destes na área experimental. Para o controle das plantas invasoras na entrelinha de cultivo, foi utilizada uma roçadeira acoplada a um trator, e entre plantas o controle foi realizado com roçadeira manual. Após cada roçada manual, a aplicação localizada de herbicida sistêmico não seletivo foi realizada.

A adubação de produção para suprir a demanda nutricional da cultura foi realizada de acordo com as recomendações de adubação propostas por FACT (2010). A adubação nitrogenada foi feita na projeção da copa da planta, parcelada em três aplicações ao longo de cada ciclo produtivo, assim como a adubação potássica e fosfatada. A adubação das plantas foi realizada utilizando os adubos químicos ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para o suprimento de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente. As quantidades de nutrientes aplicadas no ciclo vegetativo do pinhão-mansão, durante os primeiros anos de cultivo da cultura, seguiram as recomendações propostas por FACT (2010) e são expressas na Tabela 2 no item 2.3.3.

3.8 Produtividade da cultura e produtividade da água

A produtividade de frutos e sementes da cultura foi determinada por meio de colheitas manuais de todos os frutos que se encontraram a partir do ponto inicial de maturação (coloração amarela), deixando na planta apenas os frutos verdes, que foram colhidos posteriormente. Após a colheita, os frutos foram postos para secar à temperatura ambiente para a determinação do rendimento de frutos (semente + casca) e sementes para cada tratamento avaliado. Além disso, para se conhecer a influência dos tratamentos no desenvolvimento das sementes por unidade de massa nos frutos colhidos, foi determinada a relação fruto/semente para cada tratamento avaliado. A maturação dos frutos de pinhão-mansão não é uniforme, observando-se em um mesmo cacho frutos verdes, amarelos, castanhos e por fim pretos. Desta forma, em função da desuniformidade da maturação dos frutos, a periodicidade das colheitas ao longo do período produtivo ocorreu em função da maior ou menor uniformidade de distribuição da produção ao longo do tempo. Em resumo, foram avaliados a produção média de frutos e sementes por planta (kg planta^{-1}), a relação semente/fruto e a produtividade de sementes (kg ha^{-1}).

A eficiência de uso na água (EUA), segundo Lima et al. (2010), equivale a eficiência produtiva que atualmente é denominada como produtividade da água (PA), sendo determinada neste trabalho, para se avaliar a eficiência da água aplicada na irrigação para produção final de frutos. De acordo com Frizzzone (2014), nas práticas diárias de irrigação, a PA é um termo mais relevante que EUA cujo significado depende da aplicação. Segundo Sousa et al. (2000), a EUA pode ser determinada tanto para a produtividade de biomassa, como para a produtividade de frutos, relacionando-se pela quantidade de água aplicada ou evapotranspirada. No caso deste trabalho, a produtividade de água foi determinada pela relação da produção comercial da cultura (kg), ou seja, para a produção final de sementes, com a quantidade total de água aplicada (irrigação + precipitação) (FRIZZONE, 2014). A quantidade de água consumida pela planta (evapotranspiração acumulada) não foi utilizada neste estudo por ter sido determinada para as plantas que estavam inseridas no lisímetro, que no caso se encontravam em plenas condições de desenvolvimento e fornecimento de nutrientes via fertilização mineral, fato que só ocorreu para os tratamentos em que a fertilização mineral de nitrogênio foi plena (100%). O cálculo da produtividade da água ($\text{PA}_{\text{IR+PE}}$) considerou nesse estudo, a variabilidade do solo em cada área de cultivo, bem como identificar as diferenças de cada manejo hídrico, fazendo uso da irrigação complementar ou

não, e do desenvolvimento vegetativo da cultura (FRIZZONE, 2014), que a cultura pode sofrer com o estresse hídrico e com a disponibilidade de nitrogênio pela fertilização mineral. O cálculo para a produtividade de água, considerando a quantidade total de água aplicada é expressa na Equação 1:

$$PA_{IR+PE} = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura}}{\text{Volume de Irrigação+Precipitação}} \rightarrow \frac{Y_c \text{ (kg)}}{IR+PE \text{ (m}^3\text{)}} \quad (1)$$

Por não haver irrigações durante o segundo ano de avaliação no cultivo de pinhão-manso, devido à grande escassez hídrica que assolou a região Sudeste durante esse período, a produtividade de água foi determinada apenas para o primeiro ano de estudo, já que a lâmina recebida para as duas áreas de cultivo foram apenas das precipitações ocorridas no local, não havendo diferença, portanto, da lâmina recebida neste período, ficando a produtividade de água condicionada apenas para a produtividade de sementes que continuou sendo avaliada. A produtividade dos frutos e sementes, assim como as outras variáveis analisadas foram determinadas para o segundo ano de cultivo considerando que a área onde se encontra o pivô central possui um histórico de irrigação, já que fora irrigada tendo o manejo adequado de irrigação desde a implantação da cultura em 2011.

3.9 Análises de crescimento

O crescimento das plantas foi avaliado em cada tratamento, a cada três meses, por meio de medições da altura da planta (m), do diâmetro médio de copa (m) e do volume de copa (m³). A determinação da altura é definida como a medida entre a superfície do solo e a última folha emergida no ápice da planta. Para o diâmetro médio de copa, tomou-se como ponto de avaliação o valor médio entre o diâmetro de copa no sentido do maior espaçamento (entrelinha de plantio) e o diâmetro de copa no sentido de menor espaçamento (dentro da linha de plantio). As medições da altura e do diâmetro médio de copa das plantas foram realizadas em intervalos bimestrais ao longo dos dois anos de avaliação da cultura, com o auxílio de uma trena graduada em cm (Figura 7), sendo avaliadas as três plantas disponíveis por cada parcela útil. O volume de copa foi estimado pela aproximação do volume de um cilindro de base elíptica (LAVIOLA et al. 2010):

$$V_{copa} = \left(\pi \frac{D_1}{2} \frac{D_2}{2} \right) h \quad (2)$$

em que:

V_{copa} = volume de copa (m^3);

$\pi = 3,14159$;

D_1 = diâmetro de copa no maior espaçamento (m);

D_2 = diâmetro de copa no menor espaçamento (m); e

h = altura da planta (m).

Figura 7 - Medição da altura em plantas de pinhão-manso

3.10 Índice de área foliar (IAF)

As medições do índice de área foliar (IAF) foram realizadas com o auxílio do equipamento LAI-2200 da marca LI-COR®. Esse equipamento foi desenvolvido para se estimar o IAF de maneira mais prática e de forma precisa, desde que manejado de maneira adequada. Pelo fato de que no início do primeiro ciclo de avaliação se buscava a melhor metodologia para a leitura do instrumento e a validação dos dados coletados, o primeiro ano de cultivo ficou restrito apenas à leitura das plantas sorteadas na área para a calibração do equipamento junto ao cultivo do pinhão-manso, feito em diferentes épocas do ano.

As leituras do IAF foram realizadas preferencialmente no intervalo entre 10:00 e 14:00 horas, buscando a menor interferência possível das nuvens na incidência de raios solares, o que poderia prejudicar as interpretações das análises. As avaliações ocorreram de forma

mensal iniciando a partir do mês de novembro de 2014 e encerrando-se em junho de 2015 com o término do período de senescência foliar, uma vez que, a partir desse mês, as plantas de pinhão-mansão estavam praticamente com a ausência de folhas e o IAF foi considerado zero.

Para uma melhor confiabilidade na determinação dos valores de IAF medidos no campo, foi proposta uma calibração do equipamento LAI-2200 nas plantas da área experimental, realizada concomitantemente com a avaliação do experimento. A calibração do equipamento LAI-2200 foi realizada a partir de 11 plantas próximas da área experimental e escolhidas aleatoriamente. As plantas foram selecionadas ao longo do ciclo de cultivo em diferentes épocas, sendo que em cada época do período vegetativo e reprodutivo da cultura, duas plantas representativas nas duas áreas de cultivo foram escolhidas, sempre uma na área irrigada por pivô central e outra planta na área sem irrigação. A calibração foi realizada primeiramente a partir da estimativa do IAF pelo LAI-2200 feito em campo (Figura 8a e 8b), utilizando-se a metodologia de plantas isoladas, a mesma utilizada nas leituras da área experimental. Em seguida, foi feita a determinação do IAF real em laboratório pelo método destrutivo, com a retirada de todas as folhas das plantas para serem passadas em um integrador de área foliar, utilizando o equipamento CI-203 da CID Bio-Science® (Figura 8c e 8d). Com os resultados obtidos, foi feita uma comparação do IAF real com o IAF estimado a partir de um gráfico de dispersão, utilizando uma planilha eletrônica de cálculo. Assim, com base nos valores determinados, foi estipulada a equação de calibração para o IAF que foi utilizada para corrigir os valores estimados pelo LAI-2200.

Figura 8 - Metodologia adotada para a calibração do equipamento LAI 2200, com a escolha da planta (a); leitura do IAF estimado com o LAI 2200 (b); retirada de todas as folhas da planta (c) e determinação em laboratório do IAF real da planta com o equipamento CI-203 (d).

3.11 Índice de clorofila

A avaliação do estado nutricional das plantas foi determinado a partir do índice de clorofila, sendo utilizado o aparelho ClorofiLOG CFL 1030 Falker[®] (Figura 9). Foram determinados os teores das Clorofilas *a*, *b* e total ($a + b$) expressas em Índice de Clorofila Falker (ICF) e da relação clorofila A/B. As leituras procederam-se periodicamente nas folhas de posições do 2º ou 3º nó do ramo vegetativo ou florífero do ápice para base (LIMA et al., 2011), sendo as folhas coletadas para posterior análise de N foliar, para assim correlacionar os teores de clorofila com o nitrogênio presente nas folhas. Para a coleta das folhas nas posições estudadas foram consideradas apenas as folhas totalmente expandidas e contadas no sentido ápice/base, sem qualquer vestígio de lesão ocasionado por patógenos.

Figura 9 - Leitura do Índice de Clorofila FALKER utilizando o ClorofiLOG

Foram realizadas três medições por planta, sendo em três plantas por parcela, obtendo portanto, nove leituras por parcela, sendo a média das leituras o valor de ICF representativo da parcela. As leituras com o aparelho no campo foram realizadas sempre no mesmo horário, durante o período da manhã, com três avaliações ao longo do primeiro ciclo de estudo da cultura (3º ano) e cinco avaliações ao longo do segundo ciclo (4º ano). No primeiro ciclo de estudo, as avaliações ocorreram nos meses de jan/2014; mar/2014 e jun/2014, ou seja, período em que ocorre o ápice de florescimento (janeiro), formação e maturação dos frutos (janeiro e março) e o processo de senescência das folhas (junho), sendo realizada a análise foliar de N apenas no mês de março. Por sua vez, no segundo ciclo de estudo, as avaliações foram realizadas nos meses de nov/2014; dez/2014; jan/2015; fev/2015 e abr/2015, sendo possível acompanhar todo o período de desenvolvimento foliar do pinhão-mansão, acompanhando desde o ápice da emissão de folhas (45 dias após poda de limpeza e condução), passando pelo período reprodutivo (floração e formação de frutos), maturação dos frutos e início da senescência foliar. No segundo ano de estudo foram realizadas análises foliares de nitrogênio em todas as épocas. Todas as análises foliares de nitrogênio foram realizadas pelo método de digestão sulfúrica e determinação por destilação à vapor (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

3.12 Teor e análises de qualidade de óleo

A quantidade e a qualidade do óleo da cultura do pinhão-mansão foram determinadas anualmente, para cada ciclo de produção, pelo fato da cultura não apresentar produção uniforme ao longo do período produtivo, impossibilitando a repetição das análises, pelo baixo quantitativo de sementes em determinados períodos do ano. A seguir são descritos o método

de extração do óleo utilizado, os índices de qualidade e os métodos de identificação e quantificação dos ácidos graxos que foram posteriormente determinados.

3.12.1 Teor de óleo

A determinação da porcentagem de óleo por semente pode ser realizada por extração em prensa hidráulica e também por uso de solvente químico. Estes métodos são mencionados por Achten et al. (2008) e são utilizados de acordo com a necessidade do usuário. A prensa hidráulica é uma eficiente forma de extração do óleo para ser utilizado como biodiesel, enquanto a extração química é voltada para determinar a quantidade total de óleo na semente, sendo mais utilizado em testes de laboratório. Para este estudo, apenas a determinação do teor de óleo por meio de solvente químico foi realizada. Para isso, foram utilizadas amostras de 1 kg de polpa de semente por tratamento, sendo necessário retirar as sementes do epicarpo e a polpa da casca da semente antes do início da extração. O método da extração química de óleo vegetal foi realizado via Soxhlet, utilizando hexano como solvente e adotando o método oficial AOCS Am 5-04 da American Oil Chemists' Society (AOCS, 2003). Após ter passado pelo processo de extração, o óleo extraído foi quantificado em porcentagem de óleo por unidade de massa de sementes e em seguida destinado para as análises laboratoriais de qualidade que serão descritas a seguir.

Além da determinação do teor (rendimento) de óleo por unidade de massa de semente, foi calculado também a produtividade de óleo (kg ha^{-1}) que apresenta a quantidade de óleo produzido (kg) por unidade área cultivada (ha). A produtividade de óleo foi determinada utilizando o produto da produtividade de sementes (kg ha^{-1}) com o teor de óleo (decimal) (TIKKOO; YADAV; KAUSHIK, 2013), e é expressa na Equação 3:

$$\text{Produtividade de óleo} = \text{Produtiv. sementes} \times \text{Teor de óleo} \quad (3)$$

Para fins de caracterização do óleo produzido nas sementes de pinhão-mansão colhidas anteriormente na área, foi determinado o teor de óleo das sementes colhidas no ciclo anterior ao início dos tratamentos (2º ano de cultivo), para a determinação do ponto 0, que foi o ponto de partida dos valores de qualidade do óleo para as áreas de sequeiro e irrigada por pivô central, cultivados sem variação da adubação nitrogenada. O teor de óleo (Tabela 7) foi determinado por meio de prensa mecânica e por solvente químico (extrato etéreo), sendo este

último, determinado na semente integral, na qual não houve nenhuma prensagem prévia; no resíduo da prensagem mecânica (torta), para verificação do quantitativo de óleo que ficou remanescente na torta prensada; e na casca retirada para a prensagem das sementes.

Tabela 7 - Teor médio de óleo por meio de prensagem mecânica e por solvente químico nos frutos colhidos na área experimental antes da instalação dos tratamentos

Área	Teor de óleo (%)			
	Prensa mecânica	Solvente químico		
		Semente	Torta	Casca
Pivô Central	39,77	55,57	22,57	0,56
Sequeiro	41,72	54,30	18,62	0,56

3.12.2 Análises preliminares dos índices de qualidade do óleo

As análises de qualidade do óleo de pinhão-mansão que foram realizadas a partir do óleo extraído dos frutos coletados, dentro dos tratamentos aplicados na área experimental, englobaram alguns índices (padrões) qualitativos como: índice de acidez, índice de iodo, índice de peróxido, índice de refração, densidade relativa, estabilidade oxidativa, e a identificação e quantificação de ácidos graxos. Com a determinação da porcentagem de óleo do ponto zero presente nas amostras dos frutos coletados antes da instalação dos tratamentos, os óleos obtidos na prensagem mecânica foram utilizados posteriormente para a realização de análises laboratoriais na determinação de alguns índices qualitativos do óleo (Tabela 8).

Tabela 8 - Índices de qualidade do óleo de pinhão-mansão para a área experimental

Caraterística	Área	
	Pivô Central	Sequeiro
Aspecto*	LII ⁽¹⁾ - 22,0 ⁽²⁾	LII ⁽¹⁾ - 22,0 ⁽²⁾
Índice de Acidez	0,4562	0,4562
Índice de Peróxido	1,7280	1,7338
Estabilidade oxidativa (horas)	11,69	9,83
Absortividade na faixa do UV (E 232 nm)	1,2284	1,3137
Absortividade na faixa do UV (E 268 nm)	0,1638	0,1434
Massa específica a 20°C (kg m ⁻³)*	915,2	914,8
Viscosidade cinemática a 40°C (mm ² s ⁻¹)*	36,55	37,02

(1) Límpido e isento de impurezas (2) Temperatura durante a observação. *Índices determinados no Biodiesel produzido a partir do óleo extraído das amostras avaliadas.

3.12.3 Índice de acidez

O índice de acidez é um indicativo do estado de conservação do óleo e do biocombustível que será produzido, definido como a quantidade de KOH (mg) necessária para neutralizar os ácidos livres de 1 grama da amostra (ANGARITA et al., 2012). Atualmente no Brasil, a regulação estabelece um valor máximo de 0,5 mg de KOH g⁻¹ na determinação do índice de acidez no biodiesel. O método utilizado para determinação do índice de acidez foi o da norma NBR 14448 (ABNT), no qual o índice de acidez é determinado por meio de titulação potenciométrica.

3.12.4 Índice de iodo

Para determinação do índice de iodo foi utilizado o método Cd 1d-92 da American Oil Chemists' Society (AOCS, 2003), onde foi adicionado 15 mL de clorofórmio em 0,25 g de amostra do óleo extraído, agitando o composto até dissolução da amostra. Adicionou-se em seguida 25 mL do reagente de Wijs e o frasco foi tampado deixando em repouso, no escuro, durante 30 minutos. Em seguida, foi adicionado 20 mL de solução de KI a 15% e 150 mL de água destilada e titulou-se com solução de Na₂S₂O₃ 0,1 N até o desaparecimento de uma coloração amarela após agitação. Foi adicionado 1 mL de solução de amido a 1%, e continuou-se a titulação gota a gota até o desaparecimento da cor azul. Um ensaio em branco foi conduzido, paralelamente. O Índice de iodo foi obtido pela Equação (4):

$$\text{Índice de Iodo (g I}_2\text{/100 g de amostra)} = \frac{[(B-A) \times N \times 12,29]}{\text{Massa da amostra (g)}} \quad (4)$$

em que:

A - volume em mL de Na₂S₂O₃ gasto na titulação da amostra;

B - volume em mL de Na₂S₂O₃ gasto na titulação do branco; e

N - normalidade da solução de Na₂S₂O₃.

3.12.5 Índice de peróxido

Para a determinação do índice de peróxido seguiu-se o método Cd 8b-90 (AOCS, 2003) em que foram pesados 3 g da amostra em frasco de iodo de 125 mL. Adicionou-se 50 mL de solução de ácido acético/isooctano (3:1) e solução de iodeto de potássio saturada e água destilada. A seguir foi realizada titulação com solução de tiosulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0,1N e o volume gasto, após adição de goma de amido, forneceu a concentração em peróxidos, expressa em meq $\text{O}_2 \text{ kg}^{-1}$ de amostra, segundo a Equação 5:

$$\text{IP} = \frac{N \times (a-b)}{\text{Massa (gramas)}} \times 1000 \quad (5)$$

em que:

N - normalidade da solução de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$;

a - volume em mL de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ gasto na titulação da amostra; e

b - volume em mL de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ gasto na titulação do branco.

3.12.6 Índice de refração

Os óleos e gorduras possuem poder de refringência diferente conforme sua natureza, desviando com maior ou menor intensidade os raios luminosos que os atravessam. O índice de refração, tanto para os óleos quanto para as gorduras, é medido à temperatura de 40°C. Para as medições do índice de refração foi utilizado o método Cc 7-25 (2003) da AOCS, mediante o uso do Refratômetro Abbe digital de bancada da marca QUIMIS. O refratômetro Abbe foi ajustado com água destilada ($n_D^{20} = 1,3330$). Certificada a pureza (limpeza e umidade) dos primas, colocou-se 2 gotas da amostra do óleo extraído entre os prismas e fechou-os para a estabilização da temperatura. Ajustou-se o aparelho para obter a leitura mais precisa possível, e então, foi determinada a leitura na escala que forneceu diretamente o índice de refração absoluto à 40°C.

3.12.7 Densidade relativa

A densidade relativa de um óleo determina a relação da massa de um volume unitário da amostra à 40°C em relação à massa de um volume de água. A densidade foi medida em um densímetro automático digital, da marca Rudolph Research Analytical-DQM 2911, de acordo com a norma ASTM D4052.

Com o auxílio de uma seringa, o bulbo amostrador foi ambientado com a amostra de óleo. Na sequência, colocou-se a amostra no bulbo, verificando se no mesmo não houve formação de bolhas. Após a estabilização da temperatura (40°C) para cada amostra, foram realizadas as leituras de densidade, fornecidas diretamente pelo aparelho na temperatura do teste.

3.12.8 Estabilidade oxidativa

A estabilidade oxidativa do óleo de pinhão-mansão foi determinada de acordo com a norma ISO EN 6886 (2012) da Ethiopian Standard para óleos vegetais e gorduras animais, utilizando-se o equipamento Rancimat 893 (Metrohm AG, CH-9100 Herisau Switzerland) (Figura 10a) na temperatura de 110°C, sob o fluxo de ar de 10 L h⁻¹, com amostras de 5 g.

No método Rancimat, uma amostra de óleo vegetal ou biodiesel é mantida em um vaso de reação, à temperatura de 110°C e sob um fluxo de ar constante. Neste momento começam a se formar os peróxidos, que são os principais produtos formados na primeira etapa de oxidação da amostra. Com o processo de oxidação continuada, são formados compostos orgânicos voláteis, dentre estes, ácidos orgânicos de baixa massa molecular. Estes compostos são transportados pelo fluxo de ar para outro recipiente contendo água destilada, onde a presença dos ácidos orgânicos é então detectada pelo aumento da condutividade no sistema (Figura 10b). O tempo decorrente até a detecção dos ácidos orgânicos é denominado de período de indução (FLUMIGNAN et al., 2012).

Figura 10 - Rancimat em operação para determinação de estabilidade oxidativa (a) e esquema de funcionamento do equipamento (b)

3.12.9 Identificação e quantificação de ácidos graxos

Com os óleos extraídos de cada tratamento, foram coletadas amostras para a realização da identificação e quantificação dos ácidos graxos por meio de duas metodologias, sendo uma por cromatografia gasosa e a outra por ressonância nuclear magnética (RMN).

A cromatografia gasosa (CG) é o método padrão adotado pela American Oil Chemists Society (AOCS) e pela ETHIOPIAN STANDARD para a determinação do conteúdo de ácidos graxos e consiste na técnica de separação e análise de misturas por interação dos seus componentes entre uma fase estacionária (sólida/líquida) e uma fase móvel (gasosa). A CG foi realizada de acordo com a norma ES ISO 12966-2 (2012) da ETHIOPIAN STANDARD e a quantificação dos ácidos graxos pelo método da normatização, que é baseada na porcentagem relativa de área de um determinado ácido graxo em relação a área total de todos os ácidos (VISENTAINER; FRANCO, 2006).

As determinações da composição de ácidos graxos por espectroscopia de RMN de ^1H foram realizadas num espectrômetro de RMN Bruker Avance 400, operando a 9,4 T, com os núcleos ^1H a 400,13 MHz. A metodologia completa de RMN ^1H para a determinação da composição de ácidos graxos de óleos vegetais é descrita por Barison et al. (2010).

3.13 Análise dos dados

Os dados experimentais do desenvolvimento vegetativo, das variáveis fisiológicas, da produtividade e dos índices de qualidade do óleo de cada ciclo da cultura para cada tratamento foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) (valor $p > 0,01$) e de Levene (BOX, 1953) (valor $p > 0,01$) para verificação básica da normalidade e homocedasticidade residuais.

Os dados das variáveis com os valores absolutos ao final de cada ciclo de avaliação, como: produção de frutos e sementes; relação semente/fruto; produtividade de sementes; produtividade de água; teor e produtividade de óleo; além dos índices de qualidade de óleo, foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando o PROC GLM do programa computacional estatístico SAS[®] (SAS INSTITUTE, 2009). Os efeitos quantitativos foram avaliados por meio de polinômios ortogonais, utilizando análise de regressão, segundo sua significância pelo Teste F; já os efeitos qualitativos foram submetidos ao teste de médias de Tukey (valor $p < 0,05$). Para o cálculo do R^2 na análise de regressão, foi determinado o R^2 corrigido, no qual a variância das repetições foi removida (erro puro) e o cálculo fez-se por meio da relação entre o R^2 da regressão e o R^2 máximo obtido da análise de variância (BERTHOUEX; BROWN, 2002); em outras palavras, o R^2 corrigido é a porcentagem da quantidade de variação que pode ser explicada por cada modelo de regressão.

As variáveis com medidas repetidas (dados longitudinais), como as análises de crescimento, o IAF, os índices de clorofila e o nitrogênio foliar, foram analisadas por meio do modelo de análises (uni e multivariada) de perfis, que é o modelo mais simples para o caso de medidas repetidas. Inicialmente, foram realizados para cada variável os testes de normalidade e de esfericidade da matriz de variância, de forma a satisfazer às pressuposições do modelo. O teste de esfericidade utilizado neste estudo foi o teste de esfericidade de Mauchly (1940), que verifica se uma população normal multivariada apresenta variâncias iguais e as correlações nulas. Nos casos em que o teste de esfericidade de Mauchly resultou em não significativo (valor $p > 0,05$), concluiu-se que a matriz de covariâncias é do tipo esférica e o teste univariado de perfis foi analisado; caso contrário, o uso da análise multivariada de perfis (MANOVA), que é uma das alternativas recomendadas neste caso, foi adotada (FERNANDEZ, 1991). Para auxiliar na interpretação dos resultados, foram plotados os gráficos do comportamento dos perfis médios, para visualizar a presença ou ausência de paralelismo entre os perfis, e se os mesmos são horizontais. O teste estatístico multivariado

escolhido foi o teste de Traço de Pillai, pois apresenta o maior poder descritivo (tomada a decisão correta de rejeitar uma hipótese H_0 , dado que H_0 é falsa) sendo o mais robusto à não normalidade dentre os outros testes existentes na literatura, como: Lambda de Wilks, Traço de Lawley-Hotelling e a Maior Raiz de Roy (JOHNSON; WICHERN, 2007). Estas análises foram realizadas por meio do PROC GLM do SAS[®] utilizando o comando REPEATED e a opção PRINTE (SAS INSTITUTE, 2009).

A análise de regressão nas variáveis com medidas repetidas ao longo do tempo foi determinada utilizando o PROC REG do SAS[®], e para a escolha do melhor modelo a ser utilizado para cada tratamento seguiu-se de acordo com a significância das estimativas dos parâmetros de cada equação, procedendo-se também às comparações entre os modelos via critério de informação, utilizando o critério de informação de Akaike (AIC) e o critério Bayesiano de Schwarz (BIC), escolhendo ao final o menor valor para tais critérios. O cálculo do R^2 corrigido também foi utilizado para estas variáveis.

Para os dados climatológicos coletados nos dois anos de experimento, foi realizado uma estatística descritiva com os valores médios, máximos, mínimos e o desvio padrão de cada componente climático. Para os perfis cromatográficos analisados via cromatografia gasosa, o mesmo tipo de análise foi realizado, devido ao baixo número de repetições para a realização das análises e pelo fato do fator bloco não ter sido considerado nas análises. Os resultados das análises de caracterização do biodiesel não passaram por qualquer análise estatística, servindo apenas como resultado descritivo das amostras de óleo extraídas das sementes dos tratamentos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Monitoramento meteorológico

A estatística descritiva dos valores diários de umidade relativa do ar, temperaturas máxima, média e mínima, radiação global e velocidade do vento, coletados durante o período de estudo, além dos valores de ETc para cada área de manejo hídrico, são apresentados na Tabela 9. Ao longo do ciclo, a variação diária de temperatura apresentou-se alta durante o período mais frio do ano, tornando-se baixa no restante do ciclo, apresentando ao final, uma amplitude térmica diária máxima de 24,7°C e 24,8°C ao longo do primeiro e segundo ciclo, respectivamente. Mesmo assim, a região onde estava instalada a cultura apresentou uma temperatura média anual de 23,0 °C e 23,8°C para o terceiro e quarto ano de cultivo respectivamente, ficando, portanto, dentro da faixa ótima de desenvolvimento da cultura, qual seja, entre 18,0°C e 28,5°C (SATURNINO et al., 2005). Entretanto, a variação sazonal da temperatura no ano, como pode ser observada na Figura 11, e geralmente ocorrida na região com temperaturas mais amenas nos meses do outono e inverno, paralisa o crescimento das plantas ocorrendo a queda natural das folhas, o que pode provavelmente reduzir a produção de sementes (SATURNINO et al., 2005).

Tabela 9 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas observadas na área experimental

Variáveis meteorológicas	Ciclo 2013/14				Ciclo 2014/15			
	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
Tmáx (°C)	29,7	4,25	38,7	14,5	30,1	3,99	38,6	16,2
Tméd (°C)	23,0	3,61	30,9	12,3	23,8	3,20	30,2	13,6
Tmin (°C)	16,3	4,11	23,9	5,2	17,4	3,66	24,0	7,50
UR (%)	71,2	12,3	99,0	45,0	76,4	13,5	100,0	33,0
Qg (MJ m ⁻² d ⁻¹)	19,7	7,0	33,0	2,77	34,5	29,6	98,3	2,60
U ₂ (m s ⁻¹)	1,60	0,44	3,62	0,78	1,37	0,63	3,91	0,22
ETc-I (mm d ⁻¹)	3,74	2,21	8,14	0,40	3,21	2,19	8,18	0,53
ETc-S (mm d ⁻¹)	1,46	0,88	4,91	0,46	2,91	1,67	7,46	0,42

Tmáx – Temperatura máxima; Tméd – Temperatura média; Tmin – Temperatura mínima; UR – Umidade relativa do ar; Qg – Radiação global; U₂ – Velocidade do vento; ETc-I – Evapotranspiração da área irrigada; ETc-S – Evapotranspiração da área sem irrigação.

O município de Piracicaba-SP, assim como boa parte da região Sudeste, apresentou durante o ano agrícola de 2013/2014 um período atípico no regime de chuvas. A quantidade de chuvas incidida durante o verão de 2014 na área experimental e em todo o estado de São Paulo foi 90% a menos do que a média histórica ocorrida no mesmo período. Isso fez com que o nível do rio Piracicaba que circunda a área experimental se reduzisse drasticamente e o

nível de água do reservatório da fazenda experimental se esgotasse quase que por completo, o que acarretou na diminuição das irrigações realizadas ao longo do ciclo. Durante o primeiro ciclo de avaliação (agosto/2013 a julho/2014), ocorreram 587,7 mm, mal distribuídos ao longo do ciclo e concentrado na maior parte em períodos isolados. Esse valor anual descrito representa uma quantidade 56% menor do que a média histórica ocorrida no local e encontra-se abaixo do limite mínimo na qual a produção é drasticamente afetada com valores anuais inferiores a 600 mm, ocorrendo principalmente em regiões de baixa umidade, e que causa a paralisação do crescimento vegetativo (HENNING, 1996). No segundo ciclo de avaliação ocorreu aumento do período de chuvas com o valor anual (agosto/2014 a julho/2015) de 715,0 mm bem distribuídos ao longo de todo o ciclo.

T máx; – Temperatura máxima; T min – Temperatura mínima; UR - Umidade Relativa do ar; PPT (mm) – Precipitação; Eto Ac – Evapotranspiração de referência Acumulada (mm); Ppt Ac – Precipitação Acumulada (mm).

Figura 11 - Dados meteorológicos observados durante o primeiro e o segundo ciclo de avaliação da cultura

A evapotranspiração da cultura (ETc) apresentou para o terceiro e quarto ano de cultivo do pinhão-manso, para as áreas manejadas com e sem irrigação, valores próximos das médias encontradas por Lena (2013) para o primeiro ano de cultivo do pinhão-manso nas duas áreas em estudo. A semelhança dos valores de ETc para a fase de formação da cultura no campo, no seu primeiro ano de cultivo com o terceiro e quarto ano de cultivo da planta, se deve ao caso da maior taxa de evaporação do solo nos primeiros meses de cultivo, já que com o baixo porte da planta e com o número reduzido de folhas, a sua taxa diária de transpiração foi considerada baixa. Com o desenvolvimento vegetativo da planta no seu terceiro e quarto ano de cultivo, houve o aumento na taxa de transpiração das plantas, sendo superior nos tratamentos irrigados devido ao maior porte das plantas e à incidência foliar, o que ocasionou um maior sombreamento no solo, diminuindo, consequentemente, a taxa evaporativa do solo. Everson, Mengistu e Gush (2013) encontraram para plantas de pinhão-manso na África do Sul valores entre 3 a 4 mm dia⁻¹ na evapotranspiração diária das plantas durante o verão (dezembro-fevereiro), e com a queda natural das folhas no período de inverno (maio-agosto), o valor médio diário foi insignificante, sendo menor do que 1 mm dia⁻¹.

O pinhão-manso possui metabolismo fotossintético intermediário C₃-CAM (LUTTGE, 2008), e sob estímulo de falta de água, salinidade, fotoperíodo ou termoperíodo, passam a apresentar o comportamento CAM (LUTTGE; KLUGE; BAUER, 1996). No caso deste estudo, quando o cultivo esteve em períodos com altas temperaturas (> 30°C) ou quando sofreram grande restrição hídrica, no caso dos tratamentos sem irrigação, as plantas possivelmente adotaram o metabolismo CAM, economizando água e reduzindo a sua acumulação de matéria seca (PIMENTEL, 1998). Isto explica os baixos valores médios de ETc apresentados, principalmente pelos tratamentos sem irrigação, nos períodos de formação e emissão de folhas, antes do início do período caducifólio.

4.2 Irrigações realizadas

Na Figura 12 são apresentadas as lâminas aplicadas pelo sistema de irrigação por pivô central no terceiro ano de cultivo. Problemas operacionais e de manutenção no sistema de bombeamento nos meses de outubro de 2013 e janeiro de 2014 impossibilitaram a realização da irrigação na área. Devido a redução do nível do reservatório ocasionado pelo baixo volume precipitado no verão de 2014 e associado ao final da produção de frutos e início do período de senescência das folhas, a irrigação a partir do mês de julho de 2014 foi cessada, não sendo

retomada no ciclo seguinte devido a séria restrição hídrica encontrada no reservatório. No total foram aplicados no primeiro ciclo de avaliação 731,1 mm de lâmina bruta de irrigação, o que considerando o período de pleno funcionamento da moto bomba aplicou-se uma média de 3,6 mm dia⁻¹. Considerando a lâmina total recebida (irrigação + precipitação), as áreas cultivadas com irrigação por pivô central e sem irrigação receberam 1323,4 mm e 587,7 mm respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Rao et al. (2012), que avaliaram o consumo hídrico do pinhão-mansão no semiárido indiano e encontraram para plantas cultivadas sem nenhum estresse hídrico uma variação da evapotranspiração da cultura entre 1410 e 1538 mm por ano durante os anos de 2006 a 2009, e cultivado sob condições naturais, a ETc variou entre 614 e 930 mm.

Figura 12 - Lâminas de irrigação aplicadas durante o primeiro ciclo de avaliação da cultura.

4.3 Monitoramento da umidade do solo

Na Figura 13 são apresentados a variação de umidade do solo na área experimental para as quatro doses de adubação nitrogenada da área sem irrigação em quatro diferentes camadas ao longo do perfil do solo. Ressalta-se que, por apresentar apenas características de monitoramento da umidade solo, os valores apresentados foram coletados em um determinado intervalo de tempo ao longo do segundo ciclo de avaliação apenas como forma de comparação entre os tratamentos e o perfil de umidade do solo nos lisímetros de cada área onde na área irrigada o seu manejo foi adotado.

Figura 13 - Variação da umidade do solo ao longo do tempo nos tratamentos sem irrigação

A umidade do solo presente na primeira camada do solo (0-0,20 m) apresentou as maiores variações para todos os tratamentos monitorados, tendo menores variações temporais nas demais camadas do solo. De acordo com Campos et al. (1994), as alterações de umidade do solo são dinâmicas, e ocorrem em curto e longo período de tempo, sendo principalmente na camada superficial do solo.

A partir dos dados obtidos da caracterização inicial do solo feito por Flumignan (2012), como capacidade de campo, ponto de murchamento permanente e densidade do solo representativa para a área sem irrigação ao longo do perfil do solo, foi calculado o armazenamento de água no solo para os quatro tratamentos de adubação e do lisímetro de pesagem localizados próximos a área experimental (Figura 14). A partir dos dados observados, constata-se o maior consumo hídrico, e com isso, os menores volumes de água armazenados, nos tratamentos sem restrição da adubação nitrogenada, com as doses de 150% de N (S1) e 100% de N (S2), seguido também das plantas localizadas dentro dos lisímetros que foram também adubadas com 100% da recomendação de adubação para a cultura.

Figura 14 - Armazenamento de água no solo na camada de 0-0,8 m para os quatro tratamentos de adubação nitrogenada e dentro do lisímetro na área sem irrigação utilizando a sonda de capacitância Diviner 2000

A variação da umidade volumétrica do solo na área irrigada por pivô central, nos quatro tratamentos de adubação aplicados, em diferentes camadas do perfil do solo, são apresentadas na Figura 15. Assim como nos tratamentos sem irrigação, os quatro tratamentos adotados na área irrigada apresentaram o mesmo comportamento na variação de umidade no período de avaliação, com a umidade na camada de 0-0,20 m apresentando as maiores variações e as demais camadas com poucas variações ao longo do período de monitoramento. Isso se deve ao fato dessa camada apresentar-se na superfície do solo e tendo o contato direto da radiação solar acaba favorecendo no processo de evaporação da água nos primeiros centímetros de solo, estando susceptível aos ciclos de umedecimento e secagem, consequente dos eventos de precipitação e estiagem (CAMPOS et al., 1994). A maior concentração radicular da cultura nos primeiros centímetros do solo e as raízes da vegetação rasteira, contribuíram na maior absorção radicular de água nesta camada, favorecendo também, a sua maior variabilidade de umidade do solo. Aliado a esses fatores, a baixa ascensão capilar em maiores profundidades nesse solo, por apresentar lençol freático profundo, proporcionou uma menor variação de sua umidade nas camadas subsequentes.

Figura 15 - Variação da umidade do solo ao longo do tempo nos tratamentos irrigados

O armazenamento de água no solo nos tratamentos irrigados, diferente da área sem irrigação, apresentou os menores valores para os perfis de solo situados dentro dos lisímetros, seguidos em alguns momentos pelo tratamento P1 ou P2 e ao final pelo tratamento P3. O armazenamento de água no solo ao longo de período de monitoramento para os quatro tratamentos de adubação e do lisímetro de pesagem localizados na área irrigada são apresentados na Figura 16.

Figura 16 - Armazenamento de água no solo na camada de 0-0,8 m para os quatro tratamentos de adubação nitrogenada e dentro do lisímetro na área irrigada utilizando a sonda de capacitância Diviner 2000

4.4 Produtividade da cultura

Ao longo do período de colheita do terceiro ano de cultivo, realizado de janeiro/2014 a junho/2014, foram obtidos, em média, 1,58 kg de fruto por planta para toda a área experimental. Com exceção da relação fruto/semente, todas as variáveis apresentaram diferença significativa para o efeito da irrigação e do aumento da dose de adubo nitrogenado (Tabela 10), o que explica que o aumento da produção e da produtividade de frutos e sementes se dá pelo maior número de frutos produzidos, sendo o aumento da massa de sementes proporcional. Não houve interação entre o manejo hídrico e as doses de N aplicadas. O tratamento P1 (150% N – Irrigado) foi o que apresentou a melhor resposta seguido do tratamento P2 (100% N – Irrigado). Com relação às doses de adubação, em todos os casos, os tratamentos com 0% de N (P4 e S4) apresentaram desempenho inferior, diferindo estatisticamente das demais doses aplicadas (Tabela 11).

Tabela 10 - Valores de F para produção de frutos (Prod.F) e sementes (Prod.S) em kg pl⁻¹, relação semente/fruto (Rel.S/F) e produtividade de sementes (P.S.) em kg ha⁻¹

Fonte de Variação	Ciclo 2013/14					Ciclo 2014/15			
	G.L	Prod.F	Prod.S	Rel S/F	P.S.	Prod.F	Prod.S	Rel S/F	P.S.
Blocos [I]	6	13,8 ^{***}	12,5 ^{***}	0,41 ^{ns}	12,46 ^{***}	2,68 [*]	1,57 ^{ns}	1,35 ^{ns}	1,58 ^{ns}
I	1	151,2 ^{***}	148,1 ^{***}	0,17 ^{ns}	147,8 ^{***}	42,8 ^{***}	36,5 ^{***}	0,54 ^{ns}	36,5 ^{***}
N	3	30,7 ^{***}	31,9 ^{***}	3,45 ^{ns}	31,9 ^{***}	30,7 ^{***}	24,1 ^{***}	0,80 ^{ns}	24,2 ^{***}
I x N	3	0,83 ^{ns}	0,94 ^{ns}	1,94 ^{ns}	0,94 ^{ns}	1,06 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,13 ^{ns}	0,48 ^{ns}
Média geral		1,188	0,797	0,668	664,0	1,499	0,946	0,632	867,2
CV (%)		15,3	15,5	2,5	15,5	16,2	18,4	5,3	18,4

Níveis de significância: *0,01<P<0,05; **0,001<P<0,01; ***P<0,001; n.s. - não significativo; I – Irrigação; N – Doses de N; G.L – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

Tabela 11 - Produtividade média das sementes de pinhão-mansão (kg ha⁻¹) em função do manejo hídrico e doses de nitrogênio aplicado

Manejo hídrico	Doses de Nitrogênio				Médias
	150%	100%	50%	0%	
Ciclo 2013/14					
Irrigado	1107,8	971,8	873,0	589,5	885,5 A
Sequeiro	601,8	487,5	525,8	155,0	442,5 B
Médias	854,8 a	729,6 ab	699,4 b	372,3 c	
Ciclo 2014/15					
Irrigado	1308,8	1100,5	1011,0	730,0	1037,6 A
Sequeiro	1075,0	754,8	646,5	311,0	696,8 B
Médias	1191,9 a	927,6 b	828,8 b	520,5 c	

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a produtividade de sementes o modelo de regressão linear obteve o melhor ajuste, para as duas condições da produtividade de sementes em função das doses de N aplicadas nos dois anos de avaliação (Figura 17 e Figura 18). O uso da irrigação duplicou a produtividade de sementes no terceiro ano de cultivo, apresentando também uma ótima resposta com a adubação nitrogenada. O quarto ano de cultivo (segundo ano de avaliação) apresentou um considerável acréscimo na produção de frutos e sementes no cultivo sem irrigação com as maiores doses de adubo nitrogenado, onde o efeito da produção se mostrou acentuado com a complementação de água por irrigação e com a correta adubação nitrogenada, quadruplicando a sua produção em alguns casos, quando se verificou o comportamento linear crescente no 4º ano, com acréscimo de $0,0035 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $0,0047 \text{ Mg ha}^{-1}$ da produtividade de sementes para cada kg de nitrogênio aplicado por hectare, na área irrigada e sem irrigação, respectivamente. Por ser ainda uma planta em formação, é aceitável o fato da produtividade do terceiro ano de cultivo da cultura ser inferior ao ano seguinte, por receber uma menor dosagem na sua adubação de manutenção e por principalmente a cultura passar pelo processo de estabelecimento nos seus primeiros anos, já que o seu pico de produção só é observado a partir do seu quinto ano de cultivo (ARRUDA et al., 2004).

Figura 17 - Produtividade de sementes do pinhão-mansão em função das diferentes doses de adubo nitrogenado aplicado no terceiro ano de cultivo

Figura 18 - Produtividade de sementes do pinhão-mansinho em função das diferentes doses de adubo nitrogenado aplicado no quarto ano de cultivo

Patolia et al. (2007) avaliaram o desenvolvimento do pinhão-mansinho nos dois primeiros anos agrícolas de cultivo (2004/05 e 2005/06) em função da fertilização mineral de N e P, e notaram que apesar do aumento adicional da dosagem de N no primeiro ano de cultivo, não foi observado aumento significativo na produtividade, diminuindo com a aplicação da dosagem de 60 kg ha⁻¹ (N60) com relação a dosagem de 45 kg ha⁻¹ (N45). Com isso, as maiores produtividades de sementes da cultura (35,6 e 467,2 kg ha⁻¹) foram registradas com o uso de N45 e N60, em 2004/05 e 2005/06, respectivamente. A exigência de uma menor quantidade de N nos primeiros anos da cultura confirma as recomendações propostas por FACT (2010), que estabelece doses crescentes dos nutrientes a partir do seu primeiro ano de cultivo no campo até o seu quarto ano de cultivo, quando a cultura inicia o seu pico de produção.

Os resultados apresentados nesse trabalho encontram-se abaixo do relatado na literatura clássica sobre a cultura (HELLER, 1996); entretanto, por existir pouca informação sobre a cultura, muitos autores estimaram a produtividade da cultura caso o seu provável potencial fosse atingido (ARRUDA, et al., 2004; TEWARI, 2009; FACT, 2010). Em contrapartida, trabalhos mais recentes obtiveram produtividades semelhantes ou abaixo para os primeiros anos de cultivo da cultura (KHEIRA; ATTA, 2009; KESAVA RAO et al., 2012; TIKKOO; YADAV; KAUSHIK, 2013).

O aumento da produtividade de frutos e sementes com a utilização da adubação nitrogenada comprova que essa cultura, apesar de possuir características de adaptação a

condições adversas de clima e solo como a sua restrição de fertilidade, pode obter ganhos consideráveis na sua produtividade quando o solo é corretamente suprido quanto às suas exigências nutricionais. Mohapatra e Panda (2011), ao estudarem os efeitos de diferentes dosagens e combinações da adubação NPK na produção de pinhão-manso de cinco anos de cultivo, no leste da Índia, encontraram para o tratamento que recebeu a maior dosagem de N (60 g planta^{-1}), aplicado via ureia, a maior produtividade de sementes ($427,21 \text{ kg ha}^{-1}$). Yong et al. (2010) também verificaram uma maior produtividade da cultura com aplicação de maiores doses de fertilizante nitrogenado, tendo um aumento exponencial do número de frutos por planta com o aumento da dosagem de fertilizante; também foram obtidas melhorias nas características fisiológicas da planta como um maior teor de N foliar, maior capacidade de assimilação máxima de CO_2 e maior teor de clorofila total.

A prática da irrigação garantiu para o primeiro ciclo de avaliação da cultura um aumento de mais de 100% da produtividade de sementes em comparação com o cultivo em sequeiro. Para o segundo ciclo de avaliação, a área com histórico de irrigação apresentou um aumento crescente em relação ciclo passado, só que desta vez, acompanhado com o aumento do cultivo sem irrigação; ainda assim, o aumento da produtividade na área com histórico de irrigação apresentou-se com uma produtividade 48,9% maior do que o cultivo sem irrigação. O uso da irrigação complementar, assim como neste estudo, tem se apresentado essencial em outros trabalhos, para garantir o aumento da produtividade e a garantia da sobrevivência da cultura em alguns casos (KHEIRA; ATTA, 2009; BEHERA et al., 2010; SILVA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2012; TIKKOO; YADAV; KAUSHIK, 2013). Em uma área de baixada irrigada com boa fertilidade, Purcino e Drummond (1986) observaram que o pinhão-manso começou a produzir logo no segundo ano, atingindo 2000 kg ha^{-1} de sementes. Por outro lado, Drummond et al. (2007) obtiveram produtividades variando de 330 kg ha^{-1} , em condições de sequeiro, a 1200 kg ha^{-1} , em área irrigada, já no primeiro ano de cultivo em Petrolina-PE.

4.5 Produtividade da água

Na Figura 19 são apresentados os valores de produtividade de água (PA) em quilogramas de sementes produzidas, para as áreas irrigada e sem irrigação, em função das diferentes doses de nitrogênio aplicada, para o terceiro ano de cultivo do pinhão-manso. Para este estudo, foi calculada a produtividade de água apenas para o primeiro ciclo de avaliação, devido à ausência de irrigação no ciclo seguinte.

Figura 19 - Produtividade de água para a cultura do pinhão-manso para todos os tratamentos no terceiro ano de cultivo

O tratamento S1 foi o que apresentou a melhor produtividade de água com $1,02 \text{ kg m}^{-3}$, seguido por S3, P1 e S2. Comparando a prática da irrigação, os tratamentos irrigados não corresponderam proporcionalmente a uma maior produção pelo total de água aplicada na cultura, embora a PA não tenha diferido entre os diferentes tipos de manejo hídrico (Tabela 12). A produtividade média de água nos tratamentos irrigados foi de $0,67 \text{ kg m}^{-3}$, enquanto que nos tratamentos sem irrigação foi de $0,76 \text{ kg m}^{-3}$, valores estes superiores aos encontrados por Sousa et al. (2012), de $0,60 \text{ kg m}^{-3}$. O efeito da adubação nitrogenada mostrou-se altamente significativo na PA (Tabela 12), o que confirma os resultados encontrados por diversos autores em outras culturas agrícolas (NIELSEN; HALVORSON, 1991; MEDEIROS; DUBEUX JUNIOR, 2008; CHAVES; GHEYI; RIBEIRO, 2011). Assim como a produtividade da cultura, não houve interação entre o manejo hídrico e as doses de N aplicadas.

Tabela 12 – Análise de variância para produtividade de água (PA) no terceiro ano de cultivo

Fonte de Variação	G.L	Quadrado médio	F	Valor- <i>p</i>
Blocos [I]	6	0,0855	3,71	0,0141
I	1	0,0587	2,54	0,1281
N	3	0,5004	21,7	<0,0001
I x N	3	0,0696	3,02	0,0569
Resíduo	18	0,02305		
Média geral		0,715		
CV (%)		21,2		

I – Irrigação; N – Doses de N; G.L – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

Com relação aos tratamentos adubados, constata-se que apenas os tratamentos sem adubação nitrogenada tiveram uma drástica redução na produtividade de água, correspondendo com a sua baixa produtividade de sementes, diferindo dos resultados encontrados por Yang et al. (2013). A Figura 20 apresenta o diagrama de dispersão e a equação de regressão da produtividade em função das doses de nitrogênio aplicadas no solo no terceiro ano de cultivo. O modelo de regressão linear foi o único que proporcionou ajuste significativo para todos os componentes da equação, obtendo um coeficiente de determinação corrigido de 81,3%. Sousa et al. (2012) para o pinhão-manso e Barros Júnior et al. (2008) para a cultura da mamoneira também observaram um aumento linear para a PA; nesses trabalhos, tais aumentos foram resultantes do incremento da disponibilidade de água no solo. Pelo fato do uso da irrigação e da sua interação com os tratamentos adubados não ter dado efeito significativo, uma única equação de ajuste da produtividade de água em função das doses de nitrogênio foi determinada.

Figura 20 - Produtividade da água do pinhão-manso em função das diferentes doses de adubo nitrogenado aplicado no terceiro ano de cultivo

A prática da irrigação, apesar de ter gerado um aumento significativo na produtividade de frutos e sementes de pinhão-manso, não acarretou em uma variação significativa na produtividade de água para a cultura. Estes resultados apresentam-se distintos quando comparados com outros trabalhos da literatura, nos quais a aplicação da quantidade ideal de água por irrigação, com o seu correto manejo para a cultura do pinhão-manso, permitiu trazer diferentes resultados, não garantindo uma maior produtividade da água ou eficiência no seu uso. Santana et al. (2015) encontraram para as plantas de pinhão-manso irrigadas com déficit hídrico uma maior eficiência do uso da água fotossintética, com uma redução de 27% no consumo total de água; entretanto, as plantas com irrigação plena (tratamento controle), obtiveram uma maior eficiência do uso da água na produção de biomassa, devido ao efeito negativo dos tratamentos irrigados com déficit na produção de biomassa. Kheira e Atta (2009), avaliando a resposta do pinhão-manso sob déficit hídrico no Egito, encontraram valores de PA de 0,21; 0,44; 0,31 e 0,41 kg m⁻³ para 125%, 100%, 75% e 50% da Evapotranspiração da cultura, respectivamente, apresentando um ajuste quadrático, assim como foi encontrado por Deus et al. (2012). Já Sousa et al. (2012), encontraram um aumento na PA em plantas de pinhão-manso que recebiam a menor lâmina de irrigação. Estes mais variados comportamentos da cultura com relação a sua eficiência do uso da água, ou produtividade de água, como é mais comumente chamado nos dias atuais, corroboram com os relatos de Jongschaap et al. (2007) de que o pinhão-manso, apesar de possuir características de se desenvolver em regiões semiáridas e áridas tropicais, sendo então considerada como

uma cultura tolerante a escassez hídrica, ainda é pouco estudado no que se refere ao seu uso da água e à sua eficiência do uso da água.

Com isso, observa-se que, a maior produtividade de sementes encontrada no tratamento irrigado com a maior dose de nitrogênio aplicada não corresponde à maior produtividade de água que foi obtida no tratamento com a maior dose de nitrogênio aplicado só que no tratamento sem irrigação. Comportamento semelhante foi encontrado por Yang et al. (2013) que estudaram os efeitos da adição de nitrogênio e do uso da água no crescimento e desenvolvimento do pinhão-manso e encontraram que, com o maior intervalo de irrigação (12 dias), houve redução significativa no crescimento líquido da planta, na área foliar, na massa seca total e na capacidade de armazenamento da água. Entretanto, houve economia de água de irrigação de 21% quando comparado com intervalos menores (4 e 8 dias). Contudo, os autores relatam que os maiores intervalos de irrigação aumentaram a eficiência do uso da água na irrigação (EUA_i) e a eficiência do uso da água no cultivo (EUA_{et}). Assim, a combinação ideal foi o tratamento com intervalo de irrigação de 12 dias com o uso de nitrogênio, o qual pode aumentar a eficiência do uso da água, que apresenta o mesmo conceito da produtividade da água, com a diferença de que a produtividade de água é o produto da integração das taxas de produção de matéria seca e da transpiração (ou evapotranspiração) ao longo do tempo (FRIZZONE, 2014).

4.6 Análise de crescimento

Na Figura 21 é ilustrada a altura média da planta, sob condição irrigada e de sequeiro e das doses de nitrogênio, respectivamente, nos períodos de cultivo e nas épocas de avaliação; as cinco primeiras épocas de avaliação correspondem ao ciclo 2013/14 e as cinco últimas avaliações ao ciclo 2014/15. Observa-se que a irrigação influenciou muito pouco a altura da planta, sendo mais acentuado o efeito das diferentes doses de nitrogênio aplicadas. Ao final de cada ciclo produtivo, as plantas apresentaram uma altura média de 2,65 m e 3,00 m, para o terceiro e quarto ano de cultivo respectivamente. Verificou-se ainda um menor crescimento entre o segundo e o terceiro período e entre o sétimo e o oitavo período de avaliação, épocas que coincidem com a fase produtiva da cultura, corroborando com relatos de Larcher (2000). Segundo esse autor paralisações no crescimento vegetativo das plantas em função da aceleração do crescimento produtivo ocorrem pela canalização da energia e de materiais destinados à floração e à frutificação, que por sua vez originam-se no processo fotossintético,

na incorporação de substâncias minerais e na mobilização de reservas para formação e enchimentos dos frutos. Ao final da fase de maturação dos frutos é iniciado o período de senescência das folhas do pinhão-mansinho, o que gera um pequeno decréscimo no seu tamanho, evidenciado ao final de cada ciclo de avaliação.

Figura 21 - Altura média do pinhão-mansinho (m) em função do uso ou não da irrigação complementar (a) e das doses de nitrogênio (b) durante o terceiro e quarto ano de cultivo.

Os resultados da análise univariada de perfil da variável altura de planta, considerando o esquema de parcela subdividida no tempo, para o primeiro e segundo ciclo de avaliação, indicam que existem diferenças entre o tipo de manejo hídrico, as doses de N, o tempo (Dias após a poda de limpeza – DAP) e para todas as interações, com exceção da interação DAP x irrigação x doses de N para o primeiro ciclo (Tabela 13) e das interações irrigação x doses de N e DAP x irrigação x doses de N para o segundo ciclo (Tabela 14). Observa-se que a hipótese de perfis coincidentes para os demais fatores foi rejeitada ($p < 0,05$) pelo teste F, indicando que a altura do pinhão-mansinho apresenta comportamento diferenciado, conforme o tipo de manejo hídrico e a dose de N impostos.

Tabela 13 – Análise univariada de perfil para altura de plantas durante o ciclo 2013/14

Causas da variação	GL	Soma de quadrados	Quadrado médio	Teste F	Pr > F
Modelo	63	11,35799	0,180286	22,88	<0,0001
Bloco (Irrigação)	6	1,207324	0,201221	25,53	<0,0001
Doses N	3	1,064012	0,3546706	45,01	<0,0001
Irrigação	1	0,255201	0,2552006	32,38	<0,0001
Irrigação x Doses N	3	0,065522	0,0218406	2,77	0,0457
Resíduo a	18	0,484241	0,0269023	3,41	<0,0001
DAP	4	7,780440	1,9451100	246,83	<0,0001
DAP x Irrigação	4	0,103565	0,0258913	3,29	0,0143
DAP x Doses N	12	0,371960	0,0309967	3,93	<0,0001
DAP x Irrigação x Doses N	12	0,025725	0,0021438	0,27	0,9923
Resíduo b	96	0,75651	0,00788		
Total corrigido	159	12,114499			

$R^2 = 0,9376$; $CV = 3,69\%$; Média da Altura de planta (m) = 2,41

DAP – Dias após poda de limpeza; GL – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

Tabela 14 – Análise univariada de perfil para altura de plantas durante o ciclo 2014/15

Causas da variação	GL	Soma de quadrados	Quadrado médio	Teste F	Pr > F
Modelo	63	13,13087	0,2084265	17,54	<0,0001
Bloco (Irrigação)	6	1,000679	0,1667798	14,04	<0,0001
Doses N	3	4,204642	1,4015473	117,97	<0,0001
Irrigação	1	1,287016	1,2870156	108,33	<0,0001
Irrigação x Doses N	3	0,0056569	0,0018856	0,16	0,9238
Resíduo a	18	0,3705663	0,020587	1,73	0,0463
DAP	4	5,476071	1,3690178	115,23	<0,0001
DAP x Irrigação	4	0,2311438	0,0577859	4,86	0,0013
DAP x Doses N	12	0,4533988	0,0377832	3,18	0,0007
DAP x Irrigação x Doses N	12	0,1016963	0,0084747	0,71	0,7351
Resíduo b	96	1,14053	0,0118805		
Total corrigido	159	14,271399			

$R^2 = 0,9201$; CV = 3,84%; Média da Altura de planta (m) = 2,84

DAP – Dias após poda de limpeza; GL – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

Conforme esperado, pode-se observar nas análises univariadas de perfil para a altura de plantas, que nos dois anos de cultivo houve rejeição pelo teste F ($p < 0,0001$) da hipótese de perfis horizontais, que testa o efeito do tempo, indicando que, à medida que o tempo progride, há variação da altura do pinhão-mansão. De forma semelhante, a hipótese de perfis paralelos também foi rejeitada ($p < 0,05$) indicando que as interações DAP x irrigação e DAP x Doses N atuam de forma dependente no crescimento em altura do pinhão-mansão.

As análises do teste de esfericidade de Mauchly para a variável altura das plantas, para os dois anos de cultivo, são apresentadas na Tabela 15. De acordo com os resultados apresentados para cada teste, a condição de esfericidade foi satisfeita para o ciclo 2013/14 e rejeitada para o ciclo 2014/15, o que indica que para o primeiro ano de avaliação a matriz de variâncias e covariâncias apresenta uma forma chamada HUYNH-FELDT (H-F) e desta forma, o procedimento para a análise univariada de perfis pode ser utilizado. O segundo ano de avaliação por sua vez, por não satisfazer essa condição para altura das plantas, indica que o teste univariado não deve ser utilizado, procedendo-se neste caso, a análise multivariada de perfis.

Tabela 15 – Teste de esfericidade de Mauchly para altura de plantas para os dois ciclos de avaliação

Ciclo de avaliação	Grau de liberdade de F	Crítério de Mauchly (W)	Estatística Qui-Quadrado X^2	valor-p	Estatística utilizada
2013/14	9	0,43237	13,765	0,1309	Univariada
2014/15	9	0,31697	22,309	0,0079	Multivariada

Avaliando o crescimento em altura ao longo do tempo da *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, Souza et al. (2008) verificaram rejeição da condição de esfericidade pelo teste de esfericidade de Mauchly, fato este também observado por Rabello, Thiebault e Vasconcelos Junior (2015) para altura de plantas de feijão-vagem. Por outro lado, trabalhando com dados longitudinais em experimentação animal Cestari, Costa e Minho (2012) observaram que a condição de esfericidade não foi violada pelo teste de Mauchly. Neste caso, o teste univariado poderia ser utilizado, pois a matriz de variâncias e covariâncias apresentavam variâncias comuns e covariâncias nulas.

Por meio dos testes multivariados para altura de plantas, no segundo ano de avaliação, a hipótese de coincidência dos perfis médios (efeito entre indivíduos) foi rejeitada para as doses de N e para o uso de irrigação complementar, indicando que as distâncias médias entre cada um desses grupos são diferentes (Tabela 16). Nas análises intra indivíduos, o teste para o fator DAP (dias após a poda de limpeza), testou a hipótese de perfis horizontais (constantes). Esta hipótese foi rejeitada, o que indica que existem diferenças verticais entre as curvas que descrevem as alturas médias das plantas ao longo do tempo. O teste para as interações DAP x I e DAP x N testou a hipótese de perfis paralelos, que foi rejeitada para a interação DAP x I e satisfeita para DAP x N para o teste estatístico Traço de Pillai, embora ela tenha sido rejeitada para os demais testes. Com isso, conclui-se a partir desses resultados, que o crescimento em altura para a interação DAP x I é diferenciado pelo tratamento aplicado.

Tabela 16 – Resultados dos testes multivariados para os fatores entre e intra indivíduos para a variável altura no segundo ciclo de avaliação

Efeito	Causa da variação	GL	Teste F	Valor p
Entre indivíduos	Blocos (I)	6	7,30	0,0016
	I	1	40,27	< 0,0001
	N	3	43,85	< 0,0001
	I x N	3	0,06	0,9807
Intra indivíduos	DAP	4	343,34	<0,0001
	DAP x Bloco (I)	12	2,77	0,0046
	DAP x I	4	3,76	0,0216
	DAP x N	12	1,69	0,0907
	DAP x I x N	12	0,75	0,7021

DAP – Dias após poda de limpeza; GL= graus de liberdade; I – Irrigação; N – Doses de N.

De acordo com o exposto, os perfis médios de resposta da altura das plantas (m) em função das quatro doses de adubo nitrogenado e das duas condições de manejo hídrico, nos dois anos de cultivo, pode ser representado graficamente conforme a Figura 22.

Figura 22 – Perfis médios da altura das plantas de pinhão-mansó para os dois anos de avaliação

Com a exceção do primeiro período de avaliação em que os tratamentos foram recém aplicados, não havendo portanto efeito sobre as plantas, observou-se efeito significativo dos tratamentos em praticamente todos os períodos de avaliação no primeiro ciclo, ocorrendo efeito significativo das doses de nitrogênio sobre a expressão fenotípica de altura média (Figura 23). Esses resultados concordam com os encontrados por Albuquerque et al. (2009b); Oliveira e Beltrão (2010) e Yang et al. (2013). O modelo polinomial de regressão linear foi o que apresentou o melhor ajuste para a altura de plantas em função dos dias após a poda de limpeza (DAP) para todos os tratamentos, apesar da redução do crescimento médio diário na época do inverno (Tabela 17). Para o segundo ano de avaliação, o uso da irrigação mostrou um efeito superior com relação aos tratamentos não irrigados em praticamente todo o período de avaliação (Figura 24), e assim como para as doses de N de maior valor, tiveram a regressão linear como melhor ajuste para a altura das plantas (Tabela 17), onde expressou-se o aumento da altura das plantas no pico da produção não ocorrendo o seu decréscimo no termino do seu ciclo, com o início do período do inverno. Os demais tratamentos com déficit (não irrigado e com as doses de 50% e 0% de N) tiveram o modelo de regressão quadrático como o melhor ajuste para altura de plantas (Tabela 17). Na Tabela 18 são apresentados as equações de ajuste seguidos do coeficiente de determinação corrigido (R^2_{corr}) e do valor p para cada tratamento nos dois anos de avaliação.

Tabela 17 – Análise de regressão para altura de plantas em função do dia após a poda (DAP) para todos os tratamentos nos dois anos de avaliação

Modelo	Ciclo 2013/14								
	Irrigado			Não irrigado			150% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	129,2*	-268,81	-266,71	142,3*	-303,48	-301,40	78,7*	-142,10	-139,85
Quadrático	65,2 ^{ns}	-267,91	-265,69	73,2 ^{ns}	-303,81	-301,51	40,5 ^{ns}	-141,61	-139,00
Modelo	100% N			50% N			0% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	106,5*	-148,20	-146,08	132,4*	-160,41	-158,08	42,7*	-156,45	-154,16
Quadrático	56,4 ^{ns}	-149,08	-146,46	64,5 ^{ns}	-158,42	-155,93	22,0 ^{ns}	-155,63	-153,01
Modelo	Ciclo 2014/15								
	Irrigado			Não irrigado			150% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	50,5*	-225,25	-223,58	24,3*	-232,20	-230,50	45,9*	-127,68	-126,32
Quadrático	26,0 ^{ns}	-228,98	-227,05	15,3*	-238,72	-236,52	23,2 ^{ns}	-130,55	-128,78
Modelo	100% N			50% N			0% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	31,1*	-125,85	-124,39	25,7*	-137,91	-136,35	11,8*	-126,17	-124,30
Quadrático	16,4 ^{ns}	-129,14	-127,15	15,5*	-142,86	-140,48	8,1*	-129,41	-126,80

Níveis de significância: *P<0,05; n.s. - não significativo; F – Teste F.

(a)

(b)

Figura 23 - Linhas de tendência para altura de plantas de pinhão-mansão em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2013/14

(a)

(b)

Figura 24 – Linhas de tendência para altura de plantas de pinhão-mansão em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2014/15

Tabela 18 - Equações de ajuste para altura de plantas de pinhão-mansão em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada e do manejo hídrico adotado para os dois ciclos de avaliação

Equação: Altura (m) = f (DAP)			
Tratamentos		R ² _{corr}	Valor p
Ciclo 2013/14			
Irigado	2,61x10 ⁻³ DAP + 1,96605	0,9697	<0,0001
Não Irrigado	2,2 x10 ⁻³ DAP +1,96074	0,9276	<0,0001
150% N	2,58 x10 ⁻³ DAP + 1,98839	0,9710	<0,0001
100% N	2,78x10 ⁻³ DAP + 1,96031	0,9326	<0,0001
50% N	2,66x10 ⁻³ DAP + 1,92732	0,9698	<0,0001
0% N	1,59x10 ⁻³ DAP + 1,97756	0,8960	<0,0001
Tratamentos	Ciclo 2014/15	R ² _{corr}	Valor p
Irigado	2,54 x10 ⁻³ DAP + 2,56891	0,6737	<0,0001
Não Irrigado	-1,174 x10 ⁻⁵ DAP ² + 0,0053 DAP + 2,3023	0,7572	<0,0001
150% N	2,81 x10 ⁻³ DAP + 2,56395	0,8370	<0,0001
100% N	2,36 x10 ⁻³ DAP + 2,63288	0,7278	<0,0001
50% N	-1,041 x10 ⁻⁵ DAP ² + 0,00505 DAP + 2,41365	0,8040	<0,0001
0% N	-1,22x10 ⁻⁵ DAP ² + 0,00521 DAP + 2,14707	0,6583	0,0012

O diâmetro de copa para os diferentes tratamentos é apresentado na Figura 25, sob condição irrigada e de sequeiro (a) e para as doses de nitrogênio (b), respectivamente. Observou-se um comportamento semelhante ao parâmetro altura no que se refere à curva de crescimento. Assim como na altura média da planta, os tratamentos sem irrigação e sem a aplicação de nitrogênio mostraram o menor crescimento no diâmetro de copa quando comparado aos demais tratamentos. Em resumo, independente do uso da irrigação e das doses de adubo nitrogenado, o crescimento do diâmetro médio de copa seguiu o mesmo padrão para todos os tratamentos, tendo grande aumento da primeira para a segunda avaliação e aumentando com o tempo em uma taxa relativamente constante ao longo do ciclo, até a penúltima avaliação quando o diâmetro médio de copa teve uma pequena queda devido ao início do período de senescência foliar.

Na primeira avaliação realizada, o diâmetro médio geral foi de 1,54 m e ao final de cada ciclo produtivo, as plantas obtiveram um diâmetro médio de copa de 2,74 m e 3,22 m para o terceiro e quarto de ano cultivo respectivamente, assemelhando-se aos resultados apresentados por Müller et al. (2014) e superiores aos resultados de Torres et al. (2011).

A variação do diâmetro de copa das plantas ocorreu, principalmente, em função do estágio de desenvolvimento e da poda de manutenção e limpeza realizada sempre ao final de cada ciclo de cultivo. Ao longo do terceiro ano de cultivo o diâmetro de copa das plantas de

pinhão-mansos tiveram uma taxa de crescimento acentuada até março de 2014, tendo um crescimento médio diário de 0,61; 0,63; 0,59 e 0,45 cm dia⁻¹ nas doses de 150%, 100%, 50% e 0% de nitrogênio, respectivamente. Com relação ao tipo de manejo hídrico adotado, os tratamentos irrigados e sem irrigação apresentaram a mesma taxa de crescimento de 0,57 cm dia⁻¹; mesmo assim, houve diferença significativa da irrigação nos dois ciclos de avaliação, o que leva a concluir que o pinhão-manso também é exigente em água e quando suprido com as suas necessidades hídricas pode se desenvolver satisfatoriamente (FARIA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2012).

No quarto ano de cultivo, os tratamentos com menores doses de nitrogênio aplicado apresentaram as maiores taxas de crescimento diário, sendo observada no tratamento com 0% de N (0,56 cm dia⁻¹), seguido do tratamento com 100% de N (0,54 cm dia⁻¹), 50% de N (0,51 cm dia⁻¹) e 150% de N (0,35 cm dia⁻¹). Diferente do terceiro ano, os tratamentos com histórico de irrigação apresentaram menor taxa de crescimento diário (0,44 cm dia⁻¹), em comparação com o valor médio dos tratamentos na área sem irrigação (0,53 cm dia⁻¹). Isso pode ser explicado devido ao alto crescimento do diâmetro no terceiro ano dos tratamentos irrigados e com maiores doses de nitrogênio, o que diminuiu a área de crescimento das plantas que no final do quarto ano se encontravam com os ramos próximos das plantas vizinhas, mesmo com a prática da poda de manutenção e limpeza feito no final do terceiro ano. Além disso, o fato da suspensão da irrigação no quarto ano de cultivo para a área irrigada é um fator que deve ser considerado.

Figura 25 - Diâmetro médio de copa do pinhão-manso (m) em função do uso ou não da irrigação complementar (a) e das doses de nitrogênio (b) durante o terceiro e quarto ano de cultivo

Por meio da análise univariada de perfil, foi verificado que para os dois ciclos de avaliação, o diâmetro de copa apresentou diferenças, entre o tipo de manejo hídrico utilizado, as doses de N e as épocas de leitura realizadas (DAP). Para o ciclo 2013/14, a hipótese de

perfis coincidentes foi satisfatória para as interações Irrigação x Doses de N e DAP x Irrigação (Tabela 19), enquanto que para ciclo 2014/15, a interação DAP x Doses de N obteve essa condição (Tabela 20). A interação tripla DAP x Irrigação x Doses N também apresentou condição satisfatória para a hipótese de perfis coincidentes, sendo verificado para os dois anos de cultivo. Para os demais fatores, a hipótese de perfis coincidentes foi rejeitada ($p < 0,05$) pelo teste F, o que indica, nesses casos, que o diâmetro de copa do pinhão-mansinho apresenta comportamento diferenciado, conforme o tipo de manejo hídrico e a dose de N considerada, podendo haver interação ao longo do tempo para um ou mais fatores.

Tabela 19 – Análise univariada de perfis para diâmetro de copa durante o ciclo 2013/14

Causas da variação	GL	Soma de quadrados	Quadrado médio	Teste F	Pr > F
Modelo	63	45,3052	0,71913	49,68	<0,0001
Bloco (Irrigação)	6	1,538018	0,256336	17,71	<0,0001
Doses N	3	1,121413	0,373804	25,82	<0,0001
Irrigação	1	1,39876	1,39876	96,63	<0,0001
Irrigação x Doses N	3	0,118585	0,039528	2,73	0,0481
Resíduo a	18	0,829183	0,046066	3,18	0,0001
DAP	4	39,49819	9,874546	682,18	<0,0001
DAP x Irrigação	4	0,063678	0,015919	1,10	0,3612
DAP x Doses N	12	0,58035	0,048363	3,34	0,0004
DAP x Irrigação x Doses N	12	0,157028	0,013086	0,90	0,5459
Resíduo b	96	1,3896	0,014475		
Total corrigido	159	46,6948			

$R^2 = 0,9702$; CV = 4,77%; Média do diâmetro de copa (m) = 2,52

DAP – Dias após poda de limpeza; GL – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

Tabela 20 – Análise univariada de perfis para diâmetro de copa durante o ciclo 2014/15

Causas da variação	GL	Soma de quadrados	Quadrado médio	Teste F	Pr > F
Modelo	63	24,66208	0,391462	29,44	<0,0001
Bloco (Irrigação)	6	0,542885	0,090481	6,80	<0,0001
Doses N	3	3,145428	1,048476	78,84	<0,0001
Irrigação	1	1,802003	1,802003	135,51	<0,0001
Irrigação x Doses N	3	0,087148	0,029049	2,18	0,0948
Resíduo a	18	0,830395	0,046133	3,47	<0,0001
DAP	4	17,33346	4,333365	325,86	<0,0001
DAP x Irrigação	4	0,434685	0,108671	8,17	<0,0001
DAP x Doses N	12	0,28251	0,023543	1,77	0,0641
DAP x Irrigação x Doses N	12	0,203565	0,016964	1,28	0,2455
Resíduo b	96	1,27662	0,013298		
Total corrigido	159	25,9387			

$R^2 = 0,9508$; CV = 3,68%; Média do diâmetro de copa (m) = 3,13

DAP – Dias após poda de limpeza; GL – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

Para o diâmetro de copa, pode-se observar pelas análises univariadas de perfil, que nos dois ciclos de avaliação, houve rejeição pelo teste F ($p < 0,0001$) da hipótese de perfis horizontais, indicando que, à medida que o tempo progride, há variação no diâmetro de copa do pinhão-mansinho. A hipótese de perfis paralelos, por sua vez, foi rejeitada ($p < 0,05$) para a

interação DAP x Doses N e satisfeita para a interação DAP x irrigação para o ciclo 2013/14, enquanto que no ciclo seguinte, tais interações ocorreram de forma oposta.

Da mesma forma que ocorreu para altura de plantas, o teste de esfericidade de Mauchly para a variável diâmetro de copa apresentou condição de esfericidade satisfatória para o ciclo 2013/14 e foi rejeitada para o ciclo 2014/15 (Tabela 21). Com isso, sugere-se o uso da análise univariada de perfis com parcelas subdividas no tempo para o primeiro ciclo avaliação e a análise multivariada de perfis para o ciclo 2014/15.

Tabela 21 – Teste de esfericidade de Mauchly para diâmetro de copa para os dois ciclos de avaliação

Ciclo de avaliação	Grau de liberdade de F	Crítério de Mauchly (W)	Estatística Qui-Quadrado X^2	Valor p	Estatística utilizada
2013/14	9	0,53605	10,236	0,3317	Univariada
2014/15	9	0,39956	17,255	0,0449	Multivariada

O diâmetro médio de copa das plantas de pinhão-manso apresentaram, por meio dos testes multivariados, a hipótese de coincidência dos perfis médios (efeito entre indivíduos) rejeitada para as doses de N e para o uso de irrigação complementar, no segundo ano de avaliação, indicando que as distâncias médias entre cada um desses grupos são diferentes (Tabela 22). A hipótese de perfis horizontais (constantes), nas análises intra indivíduos, para o fator DAP foi rejeitada, indicando que existem diferenças verticais entre as curvas que descrevem os diâmetros médios de copa das plantas ao longo do tempo. O teste para a hipótese de perfis paralelos, foi rejeitada para as interações DAP x I e DAP x N, o que define que o crescimento do diâmetro de copa do pinhão-manso no segundo ano de avaliação é diferenciado de acordo com o tratamento aplicado.

Tabela 22 – Resultados dos testes multivariados para os fatores entre e intra indivíduos para a variável diâmetro de copa no segundo ciclo de avaliação

Efeito	Causa da variação	GL	Teste F	Valor p
Entre indivíduos	Blocos (I)	6	1,96	0,1253
	I	1	39,06	< 0,0001
	N	3	22,73	< 0,0001
	I x N	3	0,63	0,6053
Intra indivíduos	DAP	4	356,16	<0,0001
	DAP x Bloco (I)	24	2,13	0,0075
	DAP x I	4	6,89	0,0023
	DAP x N	12	2,57	0,0097
	DAP x I x N	12	1,62	0,1161

DAP – Dias após poda de limpeza; GL= graus de liberdade; I – Irrigação; N – Doses de N.

Os perfis médios de resposta, em função do diâmetro de copa do pinhão-mansó (m), para as quatro doses de adubo nitrogenado e as duas condições de manejo hídrico, nos dois anos de cultivo, é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Perfis médios do diâmetro de copa das plantas de pinhão-mansó para os dois anos de avaliação

Para o diâmetro médio de copa observou-se efeito positivo dos tratamentos aplicados em grande parte das medidas de avaliação no terceiro (Figura 27) e no quarto ano de cultivo (Figura 28). Durante os dois ciclos, houve um efeito positivo do uso da irrigação sobre a expressão fenotípica do diâmetro de copa, sendo observado um acréscimo do diâmetro nas três primeiras avaliações, decrescendo ao final do ciclo. Esses resultados corroboram com os encontrados por Albuquerque et al. (2009a) que, analisando o crescimento inicial do pinhão-mansó em condições de sequeiro no semiárido nordestino, verificaram um rápido crescimento da cultura no período chuvoso; no entanto, na época seca do ano, ocorreu uma drástica redução na sua taxa de crescimento. O modelo de regressão quadrático foi o que apresentou o melhor ajuste para o diâmetro de copa das plantas, em função dos dias após a poda de limpeza (DAP) para os diferentes tipos de manejo hídrico e doses de N, para os dois ciclos de avaliação (Tabela 23). Com isso, nos dois ciclos avaliados, se expressou o aumento do diâmetro de copa no pico da produção, decrescendo no termino do seu ciclo com o início do inverno. A redução do diâmetro médio de copa nas últimas coletas de cada ciclo corrobora

com a afirmação de Santos et al. (2010) de que o diâmetro da copa do pinhão-mansão sofre intensa redução durante a estação de inverno, com a queda das folhas, mas que essas ressurgem vigorosamente após o início das chuvas. As equações de ajuste seguidas do coeficiente de determinação corrigidos (R^2_{corr}) e do valor p para cada tratamento nos dois anos de avaliação, para diâmetro de copa, são apresentadas na Tabela 24.

Figura 27 - Linhas de tendência para diâmetro médio de copa das plantas de pinhão-mansão em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2013/14

Tabela 23 - Análise de regressão para diâmetro de copa em função do dia após a poda (DAP) para todos os tratamentos nos dois anos de avaliação

Ciclo 2013/14									
Modelo	Irrigado			Não irrigado			150% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	89,0*	-153,3	-154,5	127,2*	-179,1	-180,8	50,3*	-74,0	-75,3
Quadrático	157,1*	-220,5	-219,0	269,7*	-266,1	-264,4	95,6*	-111,0	-109,0
Modelo	100% N			50% N			0% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	80,9*	-88,8	-90,5	53,0*	-80,8	-82,0	31,6*	-81,9	-83,1
Quadrático	175,0*	-135,1	-132,9	87,3*	-113,6	-112,0	68,3*	-117,5	-115,6
Ciclo 2014/15									
Modelo	Irrigado			Não irrigado			150% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	20,7*	-189,2	-190,2	37,4*	-160,7	-161,8	12,0*	-84,1	-85,7
Quadrático	67,3*	-249,3	-247,9	85,0*	-220,6	-219,3	41,4*	-118,1	-117,5
Modelo	100% N			50% N			0% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	11,8*	-85,8	-87,9	21,8*	-95,2	-95,8	16,1*	-85,1	-85,6
Quadrático	56,6*	-129,0	-128,5	37,9*	-119,6	-118,1	37,4*	-113,1	-110,7

Níveis de significância: * $P < 0,05$; n.s. - não significativo; F – Teste F.

Figura 28 - Linhas de tendência para diâmetro médio de copa das plantas de pinhão-mansó em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2013/14

O uso de análise de medidas repetidas no tempo, fazendo uso de análises uni e multivariadas, tem sido uma alternativa no estudo do crescimento e do desenvolvimento de plantas (GEBER; DAWSON, 1990; HANCOCK et al., 2007; KING; STANTON, 2008; METCALFE et al., 2008), tais como os efeitos da disponibilidade de água para as plantas e de nutrientes, que tem servido de fontes para alguns estudos (CARROL; PALLARDY; GALEN, 2001; BREEN; RICHARDS, 2008; SANTIAGO et al., 2012). Achten et al. (2010) monitoraram algumas variáveis de crescimento e de produção de biomassa em pinhão-mansó cultivadas em casa de vegetação submetidas a três diferentes níveis de estresse hídrico, e encontraram para as mudas que sofriam estresse hídrico severo (não irrigadas), a paralisação do crescimento, o início da queda das folhas e a redução do diâmetro do caule nos primeiros dias após o início dos tratamentos. Por meio da análise de medidas repetidas os autores confirmaram que os tratamentos de nível de estresse hídrico influenciaram significativamente as variáveis de crescimento, enquanto que o tipo de Acesso não teve efeito significativo. O efeito do tempo (idade da planta) e a interação tempo X nível de estresse tiveram interação significativa (valor $p < 0,001$) influenciando no comprimento do caule, número de folhas, diâmetro na base do caule, volume de caule, fator de forma e volume total (volume de tronco + ramos) no referido trabalho.

Tabela 24 - Equações de ajuste para diâmetro de copa das plantas de pinhão-mansão em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicadas e do manejo hídrico adotado para os dois ciclos de avaliação

Tratamentos	Equação: Diâmetro de copa (m) = f (DAP)	R^2_{corr}	Pr>F
	Ciclo 2013/14		
Irrigado	$-4,18 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 + 0,01879 \text{ DAP} + 0,91195$	0,9480	<0,0001
Não Irrigado	$-3,85 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 + 0,01769 \text{ DAP} + 0,78312$	0,9694	<0,0001
150% N	$-4,38 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 + 0,01984 \text{ DAP} + 0,82331$	0,9570	<0,0001
100% N	$-3,86 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 + 0,01833 \text{ DAP} + 0,76701$	0,9749	<0,0001
50% N	$-3,89 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 + 0,01787 \text{ DAP} + 0,8647$	0,9456	<0,0001
0% N	$-3,93 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 + 0,01692 \text{ DAP} + 0,93513$	0,9531	<0,0001
Tratamentos	Ciclo 2014/15	R^2_{corr}	Pr>F
Irrigado	$-4,54 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 - 0,016 \text{ DAP} + 2,13748$	0,8901	<0,0001
Não Irrigado	$-5,42 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 + 0,01994 \text{ DAP} + 1,59186$	0,9187	<0,0001
150% N	$-5,29 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 - 0,01876 \text{ DAP} + 1,95335$	0,8588	<0,0001
100% N	$-5,53 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 - 0,01942 \text{ DAP} + 1,87746$	0,8906	<0,0001
50% N	$-4,16 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 + 0,0157 \text{ DAP} + 2,01854$	0,9074	<0,0001
0% N	$-4,93 \times 10^{-5} \text{ DAP}^2 + 0,018 \text{ DAP} + 1,60933$	0,9500	<0,0001

O volume de copa do pinhão-mansão para os diferentes tratamentos avaliados é apresentado na Figura 29. Diferente dos valores encontrados para a altura média e o diâmetro de copa, nota-se uma maior variabilidade entre os dois manejos hídricos adotados e principalmente entre as diferentes doses de adubação aplicadas. Para o primeiro ano de avaliação nesse estudo, os tratamentos sem irrigação e sem a aplicação de nitrogênio apresentaram os menores volumes de copa. Já no segundo ano de avaliação, que foi analisado a partir da sexta época de coleta, os valores apresentados foram ainda mais contrastantes. Com exceção da sétima época de coleta que coincidiu com o período de pico da produção, justificando portanto a baixa variação do volume de copa entre os diferentes tipos de manejos hídrico, as demais épocas avaliadas dentro do fator de manejo hídrico e entre as doses adubação nitrogenada apresentaram uma alta diferença entre os resultados obtidos.

O aumento do volume de copa foi influenciado diretamente pelo maior desenvolvimento em conjunto da altura e do diâmetro de copa. Os tratamentos que obtiveram o maior volume de copa apresentaram uma maior emissão de ramos laterais, que consequentemente vieram a ter um maior número de inflorescências emitidas, permitindo uma maior produção de frutos e óleo por árvore, como é o caso dos tratamentos irrigados e das doses de 150% e 100% de nitrogênio. Spinelli et al. (2010) avaliaram os efeitos diretos e indiretos das características vegetativas sobre o rendimento de óleo de pinhão-mansão com 38

meses de cultivo em espaçamento 3 x 2 m, e reportaram que ocorre um maior crescimento dos ramos no sentido do maior espaço de desenvolvimento, resultando em uma copa maior. Esses mesmos autores destacaram ainda que o volume da copa tem efeito direto sobre a produtividade de sementes, sendo a arquitetura da copa uma característica importante no cultivo do pinhão-mansão.

Figura 29 - Volume de copa do pinhão-mansão (m³) em função do uso ou não da irrigação complementar (a) e das doses de nitrogênio (b) durante o terceiro e quarto ano de cultivo

Nas Tabelas 25 e 26 são apresentados o resultado da análise univariada de perfis, para o volume de copa de pinhão-mansão, para o primeiro e segundo ciclo de avaliação, respectivamente. Assim como para altura de plantas e diâmetro de copa, o volume de copa apresentou diferenças altamente significativas entre o tipo de manejo hídrico e doses de N utilizadas. A hipótese de perfis horizontais também foi rejeitada, indicando que, à medida que o tempo progride, há variação no crescimento em volume de copa do pinhão-mansão. O resultado dos testes de paralelismo foi rejeitado para as interações DAP x Irrigação e DAP x Doses de N, para o ciclo 2013/14, enquanto que para ciclo 2014/15, apenas a interação DAP x Doses de N obteve essa condição, mostrando nesses casos comportamento diferenciado do volume de copa do pinhão-mansão entre esses tratamentos ao longo do tempo.

Tabela 25 – Análise univariada de perfis para volume de copa durante o ciclo 2013/14

Causas da variação	GL	Soma de quadrados	Quadrado médio	Teste F	Valor p
Modelo	63	4722,827	74,9655	24,91	<0,0001
Bloco (Irrigação)	6	257,981	42,9968	14,29	<0,0001
Doses N	3	288,904	96,3012	32,00	<0,0001
Irrigação	1	101,857	101,857	33,85	<0,0001
Irrigação x Doses N	3	13,2621	4,4207	1,47	0,2279
Resíduo a	18	136,315	7,5731	2,52	0,0021
DAP	4	3649,956	912,489	303,22	<0,0001
DAP x Irrigação	4	126,155	31,5387	10,48	<0,0001
DAP x Doses N	12	128,198	10,6831	3,55	0,0002
DAP x Irrigação x Doses N	12	20,2008	1,6834	0,56	0,8692
Resíduo b	96	288,898	3,0094		
Total corrigido	159	5011,726			

$R^2 = 0,9424$; CV = 13,27%; Média do volume de copa (m^3) = 13,07

DAP – Dias após poda de limpeza; GL – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

Tabela 26 – Análise univariada de perfis para volume de copa durante o ciclo 2014/15

Causas da variação	GL	Soma de quadrados	Quadrado médio	Teste F	Valor p
Modelo	63	6849,915	108,729	35,16	<0,0001
Bloco (Irrigação)	6	256,135	42,6891	13,80	<0,0001
Doses N	3	1478,784	492,928	159,40	<0,0001
Irrigação	1	662,433	662,433	214,22	<0,0001
Irrigação x Doses N	3	5,3523	1,7841	0,58	0,6315
Resíduo a	18	268,255	14,9031	4,82	<0,0001
DAP	4	4034,96	1008,74	326,21	<0,0001
DAP x Irrigação	4	11,6951	2,9238	0,95	0,4412
DAP x Doses N	12	91,8433	7,6536	2,48	0,0073
DAP x Irrigação x Doses N	12	40,4572	3,3714	1,09	0,3771
Resíduo b	96	296,862	3,0923		
Total corrigido	159	7146,777			

$R^2 = 0,9585$; CV = 7,79%; Média do volume de copa (m^3) = 22,59

DAP – Dias após poda de limpeza; GL – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

A condição de esfericidade da matriz de covariâncias para o volume de copa para os dois anos de avaliação foi satisfeita (Tabela 27), indicando que a análise univariada de perfis com parcelas subdivididas no tempo realizada anteriormente foi validada para os dois ciclos de avaliação, não sendo necessária a realização da análise multivariada de perfis para nenhum caso.

Tabela 27 – Teste de esfericidade de Mauchly para o volume de copa para os dois ciclos de avaliação

Ciclo de avaliação	Grau de liberdade de F	Crítério de Mauchly (W)	Estatística Qui-Quadrado X^2	valor-p	Estatística utilizada
2013/14	9	0,41419	14,470	0,1066	Univariada
2014/15	9	0,43446	12,590	0,1821	Univariada

Conforme os resultados apresentados das análises univariadas de perfis, os perfis médios de resposta para o volume de copa (m^3) em função das quatro doses de adubo nitrogenado e das duas condições de manejo hídrico nos dois anos de cultivo é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Perfis médios do volume de copa de pinhão-mansinho para os dois anos de avaliação

O volume médio de copa apresentou uma tendência semelhante à observada para o diâmetro médio de copa das plantas em alguns tratamentos, tendo a regressão quadrática como melhor modelo de ajuste para todos os tratamentos nos dois ciclos de avaliação; essa apresentou, para todos os tratamentos, os menores valores de AIC e BIC (Tabela 28). As equações de regressão de cada tratamento, seguidas do R^2 corrigido e do valor p , são apresentadas na Tabela 29. Independente do período em que foi avaliado, com a exceção das primeiras leituras no ciclo 2013/14, os tratamentos nos quais não houve déficit de água ou de nitrogênio foram os que apresentaram os maiores resultados para o volume de copa (Figura 31 e Figura 32). De acordo com Spinelli et al. (2010), o maior desenvolvimento da copa pode aumentar a produtividade por planta, diminuindo os custos da colheita no pinhão-mansinho.

Figura 31 - Linhas de tendência para o volume médio de copa das plantas de pinhão-mansó em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2013/14

Tabela 28 - Análise de regressão para diâmetro de copa em função do dia após a poda (DAP) para todos os tratamentos nos dois anos de avaliação

Modelo	Ciclo 2013/14								
	Irrigado			Não irrigado			150% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	96,8*	223,5	224,6	121,2*	191,2	190,9	55,4*	113,8	114,4
Quadrático	71,1*	206,4	208,4	153,0*	139,2	141,5	53,8*	97,3	99,9
Modelo	100% N			50% N			0% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	95,7*	93,7	94,2	76,0*	93,9	94,5	29,9*	96,9	97,3
Quadrático	90,8*	75,0	77,6	64,9*	79,6	82,0	35,9*	79,0	81,5
Modelo	Ciclo 2014/15								
	Irrigado			Não irrigado			150% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	37,6*	265,4	265,6	38,0*	271,6	271,6	22,8*	136,0	135,4
Quadrático	58,3*	225,0	227,3	63,4*	227,4	229,6	44,3*	107,9	110,2
Modelo	100% N			50% N			0% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	21,7*	131,8	130,7	31,4*	120,6	120,6	17,4*	119,7	119,5
Quadrático	60,6*	93,8	96,3	44,0*	98,0	100,5	35,1*	94,2	96,9

Níveis de significância: * $P < 0,05$; n.s. - não significativo; F – Teste F.

Figura 32 - Linhas de tendência para o volume médio de copa das plantas de pinhão-mansó em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2014/15

Tabela 29 - Equações de ajuste para o volume de copa das plantas de pinhão-mansão em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada e do manejo hídrico adotado para os dois ciclos de avaliação

Tratamentos	Equação: Volume de copa (m³) = f (DAP)	R² _{corr}	Pr>F
	Ciclo 2013/14		
Irigado	-2,68x10 ⁻⁴ DAP² + 0,14066 DAP – 0,82484	0,8735	<0,0001
Não Irrigado	-3,31x10 ⁻⁴ DAP² + 0,15806 DAP – 2,9731	0,9940	<0,0001
150% N	-3,54x10 ⁻⁴ DAP² + 0,17429 DAP – 2,6101	0,9583	<0,0001
100% N	-2,87x10 ⁻⁴ DAP² + 0,15268 DAP – 2,55456	0,9593	<0,0001
50% N	-2,62x10 ⁻⁴ DAP² + 0,13816 DAP – 1,35607	0,9464	<0,0001
0% N	-2,94x10 ⁻⁴ DAP² + 0,13232 DAP – 1,07514	0,9491	<0,0001
Tratamentos	Ciclo 2014/15	R² _{corr}	Pr>F
Irigado	-6,788x10 ⁻⁴ DAP² + 0,25585 DAP + 5,78175	0,9833	<0,0001
Não Irrigado	-7,289x10 ⁻⁴ DAP² + 0,27341 DAP + 0,51229	0,9806	<0,0001
150% N	-7,823x10 ⁻⁴ DAP² + 0,29396 DAP + 3,67095	0,9526	<0,0001
100% N	-8,129x10 ⁻⁴ DAP² + 0,29947 DAP + 2,91215	0,9877	<0,0001
50% N	-6,02x10 ⁻⁴ DAP² + 0,23689 DAP + 4,98426	0,9861	<0,0001
0% N	-6,182x10 ⁻⁵ DAP² + 0,22819 DAP + 1,02072	0,9974	<0,0001

Embora a arquitetura da copa do pinhão-mansão seja uma característica importante na seleção e caracterização de genótipos superiores (RAO et al., 2008; LAVIOLA et al., 2010; SPINELLI et al. 2010; BHERING et al., 2012), existem poucos trabalhos que avaliaram a diferença da arquitetura das plantas considerando conjuntamente a relação entre a projeção e a altura de copa. Segundo Rao et al. (2008), tanto o diâmetro quanto o volume da copa constituem, junto ao caracter número de ramos, os principais componentes de produção do pinhão-mansão. Para Bhering et al. (2012), a seleção direta quanto à produção de sementes em pinhão-mansão tende a estar relacionada ao diâmetro e ao volume de copa, e segundo esses autores, esta informação é relevante para prever as adaptações necessárias ao sistema de produção (espaçamento, colheidadeira), para as cultivares melhoradas que se espera obter.

4.7 Índice de área foliar (IAF)

A equação de calibração do equipamento LAI-2200 é expressa na Figura 33. A calibração foi realizada pela comparação entre o IAF estimado com o equipamento LAI-2200 e o IAF real das plantas de pinhão-mansão determinado com o equipamento CI-203 (CID Bio-Science®). O IAF foliar real foi determinado pela razão da área foliar total e a área do terreno

disponível às plantas. Para realizar a calibração do equipamento, foram utilizadas dez de um total de onze plantas, sendo excluído o valor mais extremo. Com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,8287, pode ser observado que o IAF real foi cerca de 0,93 do IAF estimado, ou seja, o equipamento LAI-2200 estava superestimando o IAF em cerca de 7%. Com a equação de calibração obtida dos valores de IAF medidos no campo ao redor da área experimental, todos os valores de IAF foram corrigidos para valores mais próximos dos reais, podendo a equação de calibração ser utilizada novamente quando as estimativas do IAF forem realizadas com o equipamento LAI-2200 nas plantas de pinhão-manso, com as mesmas características de cultivo e nas condições de clima e solo estudados.

Figura 33 - Equação de calibração do IAF para o equipamento LAI 2200

As médias do IAF foram significativamente diferentes pelo teste F entre as diferentes doses de N aplicada, uso da irrigação e época de avaliação (DAP) após o início do quarto ciclo de cultivo (2014/15), rejeitando a hipótese de perfis horizontais (Tabela 30). Pela análise univariada de perfis, identificou-se também interação significativa entre as doses de N e a época de avaliação, e interação altamente significativa entre a irrigação e a época de avaliação, rejeitando, portanto, a hipótese de paralelismo dos perfis. Assim como para as outras variáveis de crescimento (altura, diâmetro e volume de copa), não houve efeito da interação tripla Irrigação x Doses N x DAP. O efeito dos blocos dentro de cada experimento (manejo hídrico) mostrou-se significativo para o IAF, o que reforça, neste caso, o uso do delineamento em blocos aleatorizados dentro de cada experimento. Simões et al. (2014) observaram que irrigação e diferentes doses de N influenciaram no aumento da área foliar no desenvolvimento inicial de pinhão-manso, assim como a interação entre esses fatores.

Tabela 30 - Análise univariada de perfis para IAF durante o ciclo 2014/15

Causas da variação	GL	Soma de quadrados	Quadrado médio	Teste F	Valor p
Modelo	87	85,2864	0,9803	11,94	< 0,0001
Bloco (Irrigação)	6	0,9908	0,16513	2,01	0,0668
Doses N	3	4,2497	1,47166	17,26	< 0,0001
Irrigação	1	6,45795	6,45795	78,67	< 0,0001
Irrigação x Doses N	3	0,45145	0,15048	1,83	0,1431
Resíduo a	18	1,68772	0,09376	1,14	0,3161
DAP	7	61,1969	8,74242	106,50	< 0,0001
DAP x Irrigação	7	5,54613	0,7923	9,65	< 0,0001
DAP x Doses N	21	2,82023	0,1343	1,64	0,0465
DAP x Irrigação x Doses N	21	1,8855	0,08979	1,09	0,3591
Resíduo b	168	13,7914	0,08209		
Total corrigido	255	99,0778			

$R^2 = 0,8608$; CV = 22,17%; Média IAF = 1,29

DAP – Dias após poda de limpeza; GL – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

Verificou-se, por intermédio do teste de esfericidade de Mauchly, realizado com 27 graus de liberdade e aproximação *Qui-Quadrado* (35,045), que a condição de esfericidade foi satisfeita com um nível de significância de 0,1377 (Teste de Mauchly não significativo, com valor $p > 0,05$). Isto indica que a matriz de covariância nesse caso é da forma esférica, apresentando variâncias iguais e correlações nulas, podendo ser empregado o modelo de parcela subdividida no tempo pela análise univariada de perfis. Na Figura 34 são apresentados os perfis médios de resposta para o índice de área foliar (IAF), em função das quatro doses de adubo nitrogenado e das duas condições de manejo hídrico, para o segundo ciclo de avaliação.

Figura 34 – Perfis médios do IAF de pinhão-mansão em função da dose de nitrogênio aplicada e do manejo hídrico adotado

O modelo de regressão quadrático foi o que apresentou o melhor ajuste para todos os tratamentos (Tabela 31). Um fato que contribuiu para este comportamento foi o início das leituras a partir dos 45 dias após a poda de limpeza, o que impediu o ajuste dos dados iniciais das primeiras semanas que seriam menores, dado o início da nova emissão de folhas para este ciclo. O IAF apresentou uma grande variação entre os tratamentos, com os maiores valores

para os tratamentos sem déficit hídrico ou de N. Com o decorrer do tempo os valores foram se decrescendo com os todos os tratamentos atingindo a mesma faixa de IAF com o início da fase de senescência foliar (Figura 35). Na Tabela 32 são apresentadas as equações de regressão de cada tratamento, seguidas do R^2 corrigido e do valor p para o índice de área foliar.

Tabela 31 - Análise de regressão para o IAF em função do dia após a poda (DAP) para todos os tratamentos, no segundo ano de avaliação

Modelo	Irrigado			Não irrigado			150% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	134,1*	-206,3	-205,1	31,3*	-206,7	-205,9	34,9*	-83,3	-82,1
Quadrático	82,2 ^{ns}	-207,1	-260,2	50,4*	-230,2	-228,8	28,8*	-85,8	-84,6
Modelo	100% N			50% N			0% N		
	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC	F	AIC	BIC
Linear	37,2*	-98,0	-96,7	41,1*	-104,1	-102,4	20,6*	-101,1	-99,7
Quadrático	31,2*	-100,6	-99,2	28,2 ^{ns}	-104,1	-102,3	19,6*	-104,5	-103,0

Níveis de significância: * $P < 0,01$; n.s. - não significativo; F – Teste F.

Figura 35 - Linhas de tendência para o índice de área foliar (IAF) das plantas de pinhão-mansão em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicada (a) e do manejo hídrico adotado (b) para o ciclo 2014/15

Tabela 32 - Equações de ajuste para o IAF das plantas de pinhão-mansão em função dos dias após a poda (DAP) para as diferentes doses de N aplicadas e do manejo hídrico adotado para o segundo ciclo de avaliação

Tratamentos	Equação: $IAF = f(DAP)$	R^2	$Pr > F$
Irrigado	$-7,18 \times 10^{-3} DAP + 2,54196$	0,6710	<0,0001
Não Irrigado	$-7,15 \times 10^{-5} DAP^2 + 0,0185 DAP + 0,28721$	0,6899	<0,0001
150% N	$-6,49 \times 10^{-5} DAP^2 + 0,01389 DAP + 1,14529$	0,6564	<0,0001
100% N	$-6,01 \times 10^{-5} DAP^2 + 0,01285 DAP + 1,03989$	0,7574	<0,0001
50% N	$-5,6 \times 10^{-3} DAP + 2,07776$	0,6003	<0,0001
0% N	$-5,49 \times 10^{-5} DAP^2 + 0,01288 DAP + 0,6784$	0,7982	<0,0001

Freiberger (2012), estudando o efeito de doses de N no crescimento de plantas de pinhão-mansão, concluiu que os valores de área foliar ajustaram-se ao modelo quadrático, o qual permitiu estimativa de valor máximo de 6469 cm^2 para a dose estimada de 97 kg ha^{-1} de N. Oliveira (2009), avaliando o crescimento e a capacidade produtiva em função de adubação mineral no semiárido paraibano, observou que dentre as doses de N estudadas (0, 30, 60 e 90 kg ha^{-1}), a maior delas proporcionou o maior número de folhas de pinhão-mansão, com tendência linear crescente.

A disponibilidade hídrica complementada pela irrigação aumentou significativamente o índice de área foliar nos tratamentos, fato este também observado em outros trabalhos nos quais o estresse hídrico afetou esta variável (MAES et al., 2009a; ACHTEN et al., 2010; SILVA et al., 2011). Duarte et al. (2015), em um estudo sobre o desenvolvimento inicial do pinhão-mansão, confirmaram a grande capacidade que a planta tem de se adaptar ao déficit hídrico ao verificar a capacidade da planta de tolerar o estresse hídrico retardando o crescimento da parte aérea, com ajustamento da área foliar para reduzir a taxa de evapotranspiração, além de intensificar o crescimento da zona radicular. Em um outro estudo, apesar de não apresentar diferença significativa em nenhuma das épocas amostradas, Horschutz et al. (2012) constataram que as maiores médias do IAF foram observadas para os tratamentos que continham complementação hídrica.

4.8 Índice de clorofila

A clorofila é o pigmento responsável pela captação da energia solar, atuando na oxidação da água e, conseqüentemente, na liberação do oxigênio e na redução do dióxido de carbono, para a formação de cadeias carbônicas, principalmente açúcar (TAIZ; ZEIGER 2009). Segundo Barbieri Júnior (2009), o clorofilômetro é um instrumento que indica de forma indireta o teor de clorofila, com base nas propriedades óticas das folhas, sendo que os teores de clorofila total relacionaram-se diretamente com as leituras do clorofilômetro para um experimento realizado com Capim-Tifton 85, com coeficiente de determinação (R^2) acima de 85%. O autor ainda relata que a atividade fotossintética, o conteúdo de proteínas e de carboidratos solúveis, o N total e os teores de micronutrientes existentes nas folhas, são algumas das variáveis que podem ser correlacionadas com o conteúdo de clorofila no tecido foliar. Na Figura 36 são apresentadas as distribuições temporais dos valores de clorofila total

expressos em Índice de Clorofila Falker (ICF), durante o terceiro ano de cultivo, em função da dose de adubação nitrogenada (a) e do manejo hídrico (b).

Figura 36 - Variação temporal dos teores de clorofila total em função doses de nitrogênio (a) e do manejo hídrico (b) para o terceiro ano de cultivo

Como pode ser visto na Figura 36 os teores de clorofila total se apresentam com níveis muito baixos no período do florescimento e formação de frutos em comparação aos outros dois períodos, fato também observado pelas leituras realizadas no segundo ciclo de avaliação, porém com uma menor intensidade para as menores doses de N (Figura 37). Os tratamentos irrigados apresentaram maiores valores de clorofila total durante o primeiro ciclo, fato que não se repetiu no ano seguinte com o cultivo com histórico de irrigação (Figura 38). As diferentes doses de N aplicadas influenciaram positivamente o aumento do teor de clorofila total nos dois ciclos.

Figura 37 - Teores de clorofila total em função das doses de nitrogênio aplicada para o quarto ano de cultivo

Figura 38 - Teores de clorofila total em função do manejo hídrico adotado para o quarto ano de cultivo

Os valores relativos de clorofila A e B apresentaram o mesmo comportamento da clorofila total, que é a soma das duas clorofilas. Assim como na clorofila total, os valores de clorofila A e B diminuíram com a redução da adubação nitrogenada e as doses de 50% e 0% da adubação nitrogenada foram aquelas que apresentaram os menores valores (Tabela 33 e Tabela 34). Diferente desses resultados, Vale (2009), ao estudar o efeito da aplicação de nitrogênio na cana-de-açúcar, afirma que não houve efeito significativo da leitura do índice de clorofila com o aumento da aplicação de nitrogênio, mesmo com o aumento significativo na biomassa das plantas. Para o ciclo 2013/14 apenas a clorofila B não apresentou efeito da irrigação, fato que influenciou a não significância da relação clorofila A/B. Já no ano seguinte, todas as variáveis apresentaram efeito do manejo hídrico.

Tabela 33 - Valores médios dos índices de clorofila total, A e B (ICF) e da relação clorofila A/B das folhas de pinhão-mansão para todos os tratamentos avaliados no primeiro ciclo de avaliação

Manejo hídrico	Doses de Nitrogênio				Médias
	150%	100%	50%	0%	
	Clorofila Total				
Irrigado	456	450	446	422	443 B
Sequeiro	487	464	451	415	454 A
Médias	471 a	457 ab	449 b	419 c	
	Clorofila A				
Irrigado	357	353	353	337	350 B
Sequeiro	377	365	358	340	360 A
Médias	367 a	359 ab	355 b	339 c	
	Clorofila B				
Irrigado	99	97	93	85	93 A
Sequeiro	110	99	93	75	94 A
Médias	104 a	98 ab	93 b	80 c	
	Relação Clorofila A/B				
Irrigado	4,07	4,29	4,37	4,66	4,35 A
Sequeiro	3,71	4,06	4,11	4,88	4,19 A
Médias	3,89 c	4,18 bc	4,24 b	4,77 a	

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 34 - Valores médios dos índices de clorofila total, A e B (ICF) e da relação clorofila A/B das folhas de pinhão-mansão para todos os tratamentos avaliados no segundo ciclo de avaliação

Manejo hídrico	Doses de Nitrogênio				Médias
	150%	100%	50%	0%	
Clorofila Total					
Irigado	505	501	492	478	494 A
Sequeiro	495	484	447	448	469 B
Médias	501 a	493 a	470 b	463 b	
Clorofila A					
Irigado	387	389	383	376	384 A
Sequeiro	382	376	358	358	368 B
Médias	385 a	383 a	371 b	367 b	
Clorofila B					
Irigado	118	112	108	101	110 A
Sequeiro	114	108	89	88	100 B
Médias	116 a	110 a	99 b	95 b	
Relação Clorofila A/B					
Irigado	3,50	3,62	3,70	3,85	3,67 B
Sequeiro	3,46	3,61	4,14	4,19	3,85 A
Médias	3,49 b	3,61 b	3,92 a	4,02 a	

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A relação clorofila A/B apresentou os seus maiores valores para as menores doses de N (50% e 0%) aplicada, devido ao baixo teor de clorofila B presentes, principalmente nos tratamentos sem irrigação. A manutenção dos altos valores de clorofila B presente nos tratamentos com as maiores doses de N em qualquer condição é um fator positivo, pois deve salientar-se que uma proporção relativa maior de clorofila B é uma característica importante, pois possibilita a captura de fótons de outros comprimentos de onda (VIEIRA et al., 2010).

Os altos teores de clorofila apresentados nos tratamentos irrigados e com maiores doses de N, podem também ser explicados pela maior incidência de folhas devido ao estímulo da irrigação e da adubação nitrogenada, ocasionando um maior sombreamento das folhas o que faz com que elas possuam mais grana por cloroplastos, apresentando uma maior quantidade de clorofila por centro de reação (FAHL et al., 1994).

Quando submetidas a um estresse hídrico severo, os conteúdos de clorofila presentes nas folhas das plantas muitas vezes podem vir a diminuir, devido à degradação progressiva da clorofila nas folhas (MARTÍNEZ-FERRI et al., 2004; JALEEL et al., 2009; ANJUM et al., 2011), ocorrendo também para a cultura do pinhão-mansão (POMPELLI et al., 2010). No entanto, Sapeta et al. (2013) não encontraram nenhuma redução significativa nos teores de clorofila A ou B, nem mesmo com o tratamento sob máximo estresse hídrico. Os autores observaram, contudo, uma redução das razões de clorofila A/B durante o período mais seco, ocasionado devido a um aumento no conteúdo de clorofila B. Pompelli et al. (2010) também

observaram uma redução da relação clorofila A/B no pinhão-manso, embora esta redução, diferente do constatado por Sapeta et al. (2013), tenha sido acompanhada por uma diminuição no conteúdo de clorofila total, sendo principalmente de clorofila A.

Na Tabela 35 é apresentada um resumo das análises univariadas de perfis para clorofila total, A, B, relação clorofila A/B e para nitrogênio foliar, todos para o segundo ciclo de avaliação; não foram realizadas para o primeiro ciclo devido ao pouco número de medidas realizadas no período, o que comprometeria a caracterização da análise de perfis. As médias de todas as variáveis analisadas foram significativamente diferentes pelo teste F entre as diferentes doses de N aplicadas e da época de avaliação (DAP) no quarto ciclo de cultivo (2014/15), rejeitando a hipótese de perfis horizontais (Tabela 35). O uso da irrigação, por sua vez, não causou efeito para a relação clorofila A/B e para o N foliar, satisfazendo, portanto, a hipótese de perfis horizontais para estas variáveis. A hipótese de paralelismo de perfis foi rejeitada para a interação irrigação x DAP em todas as variáveis, mas satisfeita para a interação doses de N x DAP (com exceção do N foliar), indicando que estas variáveis apresentam comportamento diferenciado conforme o tipo de manejo hídrico adotado; o mesmo não ocorreu com a diferenciação das doses de N aplicadas, indicando a coincidência (paralelismo) de perfis entre esses tratamentos.

Tabela 35 – Resumo da análise univariada de perfis para os índices de Clorofila para o ciclo 2014/15

Causas da variação	GL	Clorofila Total	Clorofila A	Clorofila B	Relação Cl. A/B	N foliar
		Quadrado médio				
Modelo	63	2173,24 ^{**}	36798,1 ^{**}	629,76 ^{**}	0,513 [*]	32,61 ^{**}
Bloco (Irrigação)	6	830,97 ^{ns}	258,98 ^{ns}	196,47 ^{ns}	0,153 ^{ns}	10,82 ^{ns}
Doses N	3	11828,6 ^{**}	2749,52 ^{**}	3296,92 ^{**}	2,269 ^{**}	144,67 ^{**}
Irrigação	1	16830,5 ^{**}	6864,4 ^{**}	2197,81 [*]	0,455 ^{ns}	14,16 ^{ns}
Irrigação x Doses N	3	1815,22 ^{ns}	622,85 ^{ns}	361,56 ^{ns}	0,419 ^{ns}	11,56 ^{ns}
Resíduo a	18	392,2 ^{ns}	84,1 ^{ns}	154,16 ^{ns}	0,12 ^{ns}	5,58 ^{ns}
DAP	4	5421,96 [*]	897,9 [*]	2064,66 ^{**}	1,714 ^{**}	177,5 ^{**}
DAP x Irrigação	4	5499,87 [*]	1900,26 ^{**}	1767,59 ^{**}	2,148 ^{**}	67,58 ^{**}
DAP x Doses N	12	916,61 ^{ns}	188,96 ^{ns}	344,42 ^{ns}	0,205 ^{ns}	24,54 [*]
DAP x Irrigação x Doses N	12	1035,02 ^{ns}	274,06 ^{ns}	257,17 ^{ns}	0,238 ^{ns}	10,94 ^{ns}
Resíduo b	96	891,69	22214,30	253,87	0,231	8,39
R²		0,6153	0,6236	0,6195	0,5939	0,7183
CV (%)		6,22	4,05	15,27	12,96	9,65
Média		479,7	375,4	104,3	3,7	30,0

Níveis de significância: *0,001<P<0,01; **P<0,001; ns - não significativo; DAP – Dias após poda de limpeza; GL – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

O teste de esfericidade foi realizado após a análise univariada para cada uma das variáveis e apresentou condição de esfericidade da matriz de covariâncias satisfeita para todos os casos (Tabela 36). Validou-se, portanto, a análise univariada de perfis com parcelas

subdividas no tempo realizada anteriormente, não sendo necessária a realização da análise multivariada de perfis para nenhuma variável.

Tabela 36 – Teste de esfericidade de Mauchly para os índices de clorofila e N foliar do pinhão-mansão

Variável analisada	Grau de liberdade de F	Crítério de Mauchly (W)	Estatística <i>Qui-Quadrado</i> X^2	valor-p	Estatística utilizada
Clorofila Total	9	0,5853	8,7937	0,4565	Univariada
Clorofila A	9	0,5595	9,5321	0,3897	Univariada
Clorofila B	9	0,5816	8,8986	0,4467	Univariada
Relação Clor. A/B	9	0,3815	15,8187	0,0708	Univariada
Nitrogênio foliar	9	0,6342	7,4751	0,5878	Univariada

De acordo com os resultados apresentados nas análises univariadas de perfis, os perfis médios de resposta dos índices de clorofila total, A, B e da relação clorofila A/B em função das quatro doses de adubo nitrogenado e das duas condições de manejo hídrico para o cultivo do pinhão-mansão no ciclo 2014/15 são expressos na Figura 39.

Figura 39 – Perfis médios dos índices de clorofila do pinhão-mansão para o segundo ciclo de avaliação

Na Figura 40 são apresentados os perfis médios dos teores de N foliar ao longo segundo ciclo de avaliação em função das doses de N e do manejo hídrico adotado. Apesar de apresentar alguma variação ao longo do ciclo, o teor de N foliar apresentou baixa correlação com os teores de clorofila A, B e Total (Tabela 37); a variação do teor de N possivelmente está condicionada principalmente a alta mobilidade do nutriente na planta. O valor de N foliar

apresentou-se altamente significativo para o efeito da época ao longo do ciclo com um valor de F de 284,7. Devido a sua alta mobilidade na planta, ele apresentou os menores teores na folha selecionada, nos períodos de florescimento e formação de frutos.

Figura 40 - Variação temporal dos teores de N foliar em função das doses de N aplicadas na planta (a) e do manejo hídrico adotado (b)

Tabela 37 - Coeficientes de correlação de Pearson entre o nitrogênio foliar e os teores de clorofila na planta

	Clorofila Total	Clorofila A	Clorofila B
Correlação de Pearson	0,17961	0,16939	0,1752
Probabilidade	0,0425	0,0559	0,0462

Além da disponibilidade de nitrogênio na planta, a leitura fornecida pelo clorofilômetro pode ser afetada também por outros fatores; dentre os principais, destacam-se o cultivar, o estágio de crescimento, determinadas características anatômicas das folhas, a irradiância no momento da avaliação e a localidade (FONTES, 2011). Tais fatores necessitam ser avaliados e padronizados apesar da interação entre os mesmos tornar difícil a padronização. Adicionalmente, a concentração de clorofila varia com a condutância estomática da folha causada pelas estações do ano, sendo mais acentuada na primavera do que no verão (MATSUMOTO; OHTA; TANAKA, 2005). Segundo Schepers et al. (1992), mesmo com algumas imperfeições, o uso do clorofilômetro pode aumentar a eficiência de utilização do adubo nitrogenado pelas culturas e tem propiciado melhor manejo da adubação nitrogenada em cobertura, chamado de “adubação quando necessária”.

Com exceção dos valores referentes ao mês de janeiro/2014, os teores de N foliar dos tratamentos irrigados e com as maiores doses de N aplicado via fertilizante mineral mostraram-se relativamente superiores quando comparados com os demais tratamentos. Segundo Fernández et al. (1994), um acréscimo no suprimento de N estimula o crescimento,

atrasa a senescência e muda a morfologia das plantas; além disto, o aumento dos níveis de adubação nitrogenada causa crescimento significativo no conteúdo de clorofila das folhas. Laviola e Dias (2008) citam que o N foi o nutriente mais requerido para a formação de folhas, tal como para suprir a demanda metabólica de frutos de pinhão-manso. Esses mesmos autores calcularam teores médios de nitrogênio nas folhas de 36,4 g kg⁻¹ após o terceiro ano de implantação da cultura, valores estes maiores dos que os obtidos neste estudo. Schulz et al. (2014) encontraram valores próximos a 40 g kg⁻¹ no cultivo do pinhão-manso consorciado com capim tifton e valores acima 50 g kg⁻¹ quando cultivado em solteiro. Segundo Kerbauy (2008) a demanda de N varia com a espécie e o teor de N com a parte da planta analisada e, para um crescimento adequado, a concentração ótima está na faixa de 20 a 50 g kg⁻¹ de matéria seca da planta.

4.9 Teor e análises de qualidade de óleo

O resumo da análise de variância dos resultados do rendimento (teor) médio e da produtividade do óleo de pinhão-manso para o terceiro e quarto ano de cultivo em função do manejo hídrico adotado e da dose de adubação nitrogenada são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 - Valores de F para o teor médio (%) e a produtividade de óleo (kg ha⁻¹) em sementes de pinhão-manso para todos os tratamentos avaliados

Fonte de Variação	Ciclo 2013/14			Ciclo 2014/15	
	G.L	Teor de óleo	Produtiv. de óleo	Teor de óleo	Produtiv. de óleo
Blocos [I]	6	1,00 ^{ns}	12,78 ^{***}	0,67 ^{ns}	1,53 ^{ns}
I	1	11,21 ^{**}	139,16 ^{***}	17,79 ^{***}	32,44 ^{***}
N	3	0,45 ^{ns}	33,52 ^{***}	25,33 ^{***}	22,88 ^{***}
I x N	3	1,92 ^{ns}	1,37 ^{ns}	5,14 ^{***}	0,97 ^{ns}
Média geral		54,1	357,44	53,4	458,76
CV (%)		2,9	15,4	1,97	18,2

Níveis de significância: *0,01<P<0,05; **0,001<P<0,01; ***P<0,001; n.s. - não significativo; I – Irrigação; N – Doses de N; G.L – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

Para o primeiro ciclo de avaliação apenas o manejo hídrico apresentou efeito significativo para o rendimento do óleo, apresentando um valor médio de 54,1%. Diferente disso, para o mesmo período de estudo, a produtividade de óleo apresentou diferença significativa em praticamente todos os aspectos, com exceção da interação dos experimentos de irrigação e os tratamentos adubados, chegando a duplicar a produtividade de óleo com a complementação da irrigação no seu terceiro ano de cultivo (Tabela 39). Tal efeito também se

assemelhou ao segundo ciclo de avaliação para a produtividade de óleo, com diferenças encontradas para o efeito da irrigação e das doses de nitrogênio aplicadas. O teor de óleo, diferente do primeiro ciclo de avaliação, apresentou melhor resposta com o efeito da dose de nitrogênio aplicada e da complementação da irrigação; entretanto, observou-se um menor teor de óleo nos tratamentos com adubação nitrogenada e no cultivo irrigado, sendo este último também ocorrido no ciclo seguinte (Tabela 39). Diferente disso, Kalannavar (2008) relataram altos valores do teor de óleo extraído mecanicamente (37,91%) e da produtividade de óleo (970,74 kg ha⁻¹) do pinhão-manso quando adubado com 100 kg N ha⁻¹, valores estes superiores aos encontrados para as dosagens de 50 e 150 kg N ha⁻¹. O aumento do teor de óleo com o uso da irrigação e da adubação nitrogenada também foram relatados por Tikkoo; Yadav; Kaushik, (2013) que observaram um aumento de até 9% com o uso da irrigação e aumentos de 1,7; 3,3 e 6,4% de óleo com a aplicação de 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, sobre o tratamento controle.

Tabela 39 - Valores Médios do teor e produtividade de óleo em função do manejo hídrico e da dose de nitrogênio aplicada

Manejo hídrico	Doses de Nitrogênio				Médias
	150%	100%	50%	0%	
	Teor de óleo (%) - Ciclo 2013/14				
Irrigado	53,8	53,5	52,9	52,4	53,2 B
Sequeiro	53,5	55,6	55,4	55,6	55,0 A
Médias	53,7 a	54,6 a	54,2 a	54,0 a	
	Teor de óleo (%) - Ciclo 2014/15				
Irrigado	51,5 Bb	52,1 Ab	51,9 Ab	54,9 Ba	52,6
Sequeiro	54,8 Aab	51,6 Ac	53,0 Abc	57,3 Aa	54,2
Médias	53,1	51,9	52,4	56,1	
	Produtividade de óleo (kg ha ⁻¹) – Ciclo 2013/14				
Irrigado	598,5	519,9	460,5	309,2	472,0 A
Sequeiro	322,0	272,1	291,3	86,0	242,9 B
Médias	460,3 a	396,0 ab	375,9 b	197,6 c	
	Produtividade de óleo (kg ha ⁻¹) – Ciclo 2014/15				
Irrigado	674,4	573,2	524,4	399,6	542,9 A
Sequeiro	589,1	388,3	342,8	178,3	374,7 B
Médias	631,8 a	480,8 b	433,6 b	288,9 c	

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observando os resultados apresentados constata-se que, de uma forma geral, os tratamentos não irrigados apresentaram maiores teores de óleo quando comparados com os tratamentos irrigados, apresentando uma média de 55,04% contra 53,17% dos tratamentos em que foi utilizada a prática da irrigação. Os teores médios de óleo obtidos encontram-se dentro da faixa dos teores relatados por Sluszz e Machado (2011); Arruda et al. (2004); Haas e Mittelbach (2000); e Akintayo (2004).

Comportamento semelhante dos resultados encontrados para o rendimento de óleo, foram observados por Deus et al. (2012), que avaliaram o rendimento e a produtividade de óleo do pinhão-manso sobre diferentes lâminas de irrigação e níveis de adubação potássica e observaram que o uso da irrigação proporcionou uma diminuição nos valores de rendimento de óleo nos grãos e aumento da produtividade do óleo, que foi proporcionado pelo aumento da produtividade de grãos com o aumento da lâmina de irrigação.

Apesar do teor médio de óleo ter sido levemente superior no terceiro ano de cultivo, tal fato não influenciou a produtividade de óleo do ano seguinte que foi superior (472 kg ha^{-1}), devido principalmente à boa produtividade de sementes alcançada no período. Outro ponto a ser destacado, é que a ausência da irrigação no quarto ano de cultivo não interferiu na produtividade de óleo que obteve valores 69,0% superiores do encontrado para o cultivo sem irrigação desde a sua implantação; quando a comparação se resume apenas no terceiro ano, o cultivo irrigado obteve produtividade de óleo 51,5% superior ao cultivo sem irrigação (Tabela 39). Estes resultados dão margem para que novos estudo possam ser realizados para a maximização do uso da irrigação, na potencialização da produção de óleo e sementes do pinhão-manso durante a sua fase de formação e estabelecimento (até o quarto de cultivo), e em períodos posteriores ao seu pico de produção (a partir do quinto ano de cultivo).

Para os dois ciclos de avaliação (3º e 4º ano de cultivo) os tratamentos com as diferentes doses de adubação e tipos de manejo hídrico, apesar de não promoverem grande variação no teor de óleo intrínseco das sementes, melhoraram consideravelmente o rendimento do óleo vegetal em geral (Tabela 39), com aumento do número total de frutos/sementes produzidas por planta. Resultados semelhantes foram encontradas por Yong et al. (2010) e Tikkoo; Yadav; Kaushik, (2013). As relações diretas da produtividade de grãos com o rendimento de óleo do pinhão-manso foram estudadas por Spinelli et al. (2010), que ao quantificarem os efeitos diretos e indiretos de características vegetativas e da qualidade da matéria-prima no rendimento de óleo do pinhão-manso, observaram que a produtividade de grãos foi o componente mais importante do rendimento de óleo, seguida do volume de copa e do teor de óleo nos grãos.

Para a produtividade de óleo foi encontrado, para o terceiro ano de cultivo, um modelo de ajuste linear para o cultivo irrigado e um modelo polinomial de segundo grau para o manejo hídrico sem irrigação em função das doses de nitrogênio aplicadas naquele período (Figura 41). No quarto ano de cultivo, com o aumento da aplicação de N por unidade de área, o modelo de regressão linear obteve o melhor ajuste para as duas condições da produtividade de óleo em função das doses de N aplicadas nesse período (Figura 42). Assim como para a

produtividade de sementes, o cálculo do R^2 corrigido foi determinado, para a produtividade de óleo em função das doses de adubação utilizada, para cada manejo hídrico nos seus dois anos de estudo.

Figura 41 - Produtividade de óleo do pinhão-mansó em função das diferentes doses de adubo nitrogenado aplicado no terceiro ano de cultivo

Figura 42 - Produtividade de óleo do pinhão-mansó em função das diferentes doses de adubo nitrogenado aplicado no quarto ano de cultivo

O uso da irrigação como complementação de água para o cultivo do pinhão-mansó pode trazer grandes aumentos na produtividade de sementes e de óleo como foi confirmado

por esse estudo. Mas a falta ou até o excesso da água aplicada à planta podem diminuir o seu potencial produtivo. Em um experimento conduzido em solos arenosos do Egito, Kheira e Atta (2009) avaliaram a resposta do pinhão-mansó em condições de déficit hídrico, e concluíram que a lâmina ótima aplicada, que foi correspondente a 100% da evapotranspiração potencial (ETp), proporcionou para as plantas de pinhão-mansó os maiores valores de rendimento e produtividade de óleo, além da melhor eficiência do uso da água na produção de sementes e de óleo de pinhão-mansó ($0,44$ e $0,13 \text{ kg m}^{-3}$), respectivamente. Os resultados concluíram que a eficiência do uso da água da produção de sementes e de óleo de pinhão-mansó diminuíram com a redução e o aumento da taxa de aplicação de água a partir da aplicação ideal de água para a cultura (100% ETp).

O resultado da análise de variância com os valores do teste F dos índices de qualidade do óleo em função do manejo hídrico e da adubação nitrogenada, para os dois ciclos de avaliação do pinhão-mansó, são encontradas na Tabela 40. Pela ANOVA, verifica-se que apenas o fator irrigação influenciou os índices de acidez, peróxido, iodo e estabilidade oxidativa em pelo menos um dos ciclos avaliados, não havendo efeito das doses de nitrogênio e da sua interação com a irrigação.

Tabela 40 - Valores de F para os índices de acidez (IA), iodo, peróxido (IP) e estabilidade oxidativa (EO) para os dois ciclos de avaliação

Fonte de Variação	G.L	Ciclo 2013/14				Ciclo 2014/15			
		IA	Iodo	IP	EO	IA	Iodo	IP	EO
Blocos [I]	2	0,39 ^{ns}	0,32 ^{ns}	1,00 ^{ns}	0,66 ^{ns}	2,22 ^{ns}	0,14 ^{ns}	8,92 [*]	0,69 ^{ns}
I	1	7,94 [*]	4,53 ^{ns}	0,09 ^{ns}	1,32 ^{ns}	0,66 ^{ns}	28,5 ^{**}	39,9 ^{***}	11,2 [*]
N	3	0,71 ^{ns}	0,72 ^{ns}	1,91 ^{ns}	0,60 ^{ns}	2,43 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,70 ^{ns}	4,99 ^{ns}
I x N	3	0,72 ^{ns}	1,46 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Média geral		3,36	101,3	0,369	21,7	0,526	77,8	0,236	16,1
CV (%)		94,1	4,77	289,6	23,8	40,5	17,1	63,4	8,62

Níveis de significância: * $0,01 < P < 0,05$; ** $0,001 < P < 0,01$; *** $P < 0,001$; n.s. - não significativo; I – Irrigação; N – Doses de N; G.L – Graus de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação.

Os valores de densidade relativa e do índice de refração não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos estudados nos dois anos de avaliação, apresentando valores médios para o ciclo de 2013/14 de 0,911 e 1,463 respectivamente para densidade e refração; já para o ciclo 2014/15 os valores médios de densidade relativa e índice de refração foram de 0,885 e 1,458, respectivamente. Os valores do índice de refração encontrados nesse estudo são similares aos que foram encontrados por Akintayo (2004) e Kheira e Atta (2009), que relataram, respectivamente, um valor médio de 1,468 e 1,47 para o índice de refração a 25°C do óleo de pinhão-mansó. Estes resultados, assim como o que foi encontrado nesse estudo,

estão enquadrados dentro da faixa ou do limite máximo permitido de acordo com o estabelecido pela legislação vigente (ANVISA, 1999) e por outros estudos (BIODIESELBR, 2011).

A densidade relativa, também pouco variável entre os diferentes tipos de tratamentos, apresentou valores próximos aos encontrados por Akintayo (2004); BiodieselBR (2011); Akbar et al. (2009) e Oliveira et al. (2009). De acordo com Portela (2011), a densidade é uma propriedade que não sofre grandes variações; isso se deve ao fato do óleo apresentar densidade semelhante a de seus ésteres metílicos; porém, o seu controle é de grande importância tendo em vista que uma densidade elevada pode provocar problemas quanto a injeção do combustível na câmara de compressão, podendo ocasionar obstrução dos bicos injetores, injeção de pouco combustível. Do mesmo modo, uma baixa densidade causa uma injeção exagerada, possibilitando haver uma queima incompleta ou consumo excessivo do combustível.

Na Tabela 41 são apresentados os valores dos demais índices de qualidade, somente em função do manejo hídrico, visto que foi o único fator que influenciou em pelo menos um dos ciclos os índices de acidez, peróxido, iodo e estabilidade oxidativa.

Tabela 41 - Valores médios dos índices de qualidade de óleo em função do manejo hídrico adotado nos dois ciclos de avaliação

Manejo hídrico	Ciclo 2013/14			
	Índice de acidez	Índice de iodo	Índice de peróxido	Estabilidade Oxidativa
Irigado	1,13 b	103,8 a	0,29 a	20,2 a
Sequeiro	5,58 a	98,7 a	0,45 a	23,2 a
Médias	3,36	101,3	0,37	21,7
Manejo hídrico	Ciclo 2014/15			
	Índice de acidez	Índice de iodo	Índice de peróxido	Estabilidade Oxidativa
Irigado	0,57 a	60,1 b	0,47 a	14,9 b
Sequeiro	0,48 a	95,6 a	0,01 b	17,3 a
Médias	0,53	77,9	0,24	16,1

Médias seguidas de mesma letra, minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O índice de acidez, único índice de qualidade que teve diferença significativa no primeiro ciclo de avaliação, apresentou altos valores nesse período. Esse fato nem sempre pode estar condicionado às condições de campo em que a cultura foi submetida, podendo estar relacionado com as condições de coleta, refrigeração e armazenamento das sementes e as técnicas de extração do óleo das sementes; estas, se mal-empregadas, favorecem a degradação oxidativa e a hidrólise dos triglicerídeos contidos no óleo, alterando de forma significativa as propriedades físico-químicas do mesmo (SILVA, 2005). Segundo Angelucci et al. (1987), o alto teor de acidez de um óleo bruto aumenta a perda da neutralização, sendo

também indicador de sementes de baixa qualidade, de manuseio e armazenamento impróprios ou de um processamento insatisfatório.

O tipo de extração do óleo pode influenciar no índice de acidez. Pereira, Coelho e Mendes (2011), encontraram para o óleo de pinhão-manso extraído por prensa uma acidez baixa, com um valor médio de $1,8 \text{ mg KOH g}^{-1}$ quando comparado com o óleo extraído com hexano, com valores acima de $15,1 \text{ mg KOH g}^{-1}$. O aumento do tempo de armazenamento do óleo extraído é outro fator que pode trazer a elevação do seu índice de acidez (RIBEIRO et al. 2010).

Considerando os resultados de uma forma geral, apenas os tratamentos sem irrigação foram os que apresentaram um valor médio do índice de acidez acima dos limites estabelecidos para óleos não refinados, que estabelece um valor máximo de $4,0 \text{ mg KOH g}^{-1}$ (ANVISA, 2005). Ainda assim, os valores se encontram abaixo dos determinados por Oliveira et al. (2009) de $8,45 \text{ mg KOH g}^{-1}$ e próximos dos valores encontrados por Akintayo (2004); Kpoviessi et al. (2004) e Achten et al. (2008).

O óleo de pinhão-manso extraído apresentou um baixo índice de peróxido para todos os tratamentos e só foi significativo devido à presença quase nula de peróxidos nos tratamentos sem irrigação do segundo ciclo de avaliação. A presença de peróxidos, por menor que seja, indica que o óleo sofreu oxidação, mas não a ponto de comprometer a sua qualidade original. Nem o fato da extração ter sido feita com solvente orgânico implicou em um aumento elevado do índice de peróxido, fato esse observado por Pereira, Coelho e Mendes (2011). Apesar de não ser um requisito de análise de combustíveis, o índice de peróxido vem se mostrando um objeto de estudo interessante, uma vez que a reação de oxidação é muitas vezes iniciada na sua presença, além de se observar aumento do índice de peróxido com o passar do período de estocagem (RIBEIRO et al. 2010; PORTELA, 2011). Os valores do índice de peróxido determinados encontram-se muito abaixo dos relatados por BiodieselBR (2011) ($9,98 \text{ meq kg}^{-1}$) e Akbar et al. (2009) ($1,93 \text{ meq kg}^{-1}$) e da quantidade estabelecida pela Anvisa (2005) de $15,0 \text{ meq kg}^{-1}$.

O índice de iodo apresentou baixa variação no primeiro ciclo de avaliação ($98,7\text{-}103,8 \text{ g I}_2 \text{ 100 g}^{-1}$) em comparação com o segundo ($60,1\text{-}95,6 \text{ g I}_2 \text{ 100 g}^{-1}$). Esses resultados mostram uma menor capacidade de absorção de iodo pelas duplas ligações dos ácidos graxos insaturados do óleo extraído, principalmente dos óleos extraídos dos tratamentos irrigados do segundo ciclo. Esse fato é considerado importante para a qualidade do óleo de pinhão-manso, já que o seu óleo tende a ser mais resistente à oxidação por possuir um baixo índice de iodo em relação aos demais óleos vegetais estudados, satisfazendo dessa forma uma importante

característica requerida como matéria-prima para produção de biodiesel, possibilitando também um maior tempo de armazenamento se houver necessidade.

Pereira, Coelho e Mendes (2011), ao realizarem os ensaios do índice de iodo com o óleo de pinhão-manso extraído com hexano, encontraram valores de índice de iodo de 91-98 g I₂ 100 g⁻¹ e com etanol um índice de iodo de 106-108 g I₂ 100 g⁻¹. Akintayo (2004) relatou um valor de índice de iodo de 105,2 mg I₂ g⁻¹, valor próximo do encontrado por Akbar et al. (2009), enquanto que Kpoviessi et al. (2004) relataram valores para o índice de iodo de 92 a 93 g I₂ 100 g⁻¹. Os resultados destes autores comparados com os resultados do presente trabalho estão de acordo, indicando que o óleo do pinhão-manso possui um alto grau de insaturação.

A estabilidade à oxidação mostrou-se também variável com a influência da irrigação; os tratamentos não irrigados apresentaram de uma forma geral um maior período de indução determinado pelo equipamento, o que confere uma maior estabilidade à oxidação a esses óleos e um maior tempo de vida útil no seu armazenamento. O óleo de pinhão-manso apresenta um maior tempo de estabilidade à oxidação quando comparado ao óleo de outras culturas usadas para a produção de biodiesel como a soja e o girassol. Dessa forma, a estabilidade oxidativa do óleo de pinhão-manso mostrou-se satisfatória, já que a quantidade exata de saturações é medida pelo ensaio de Índice de Iodo, e a presença de saturações nas moléculas do biodiesel está fortemente ligada à estabilidade oxidativa, pois são as duplas ligações existente nos ésteres metílicos que sofreram a oxidação durante o armazenamento. Sendo assim, é possível dizer que a estabilidade oxidativa do biodiesel de pinhão-manso é superior a 6 horas à 110° C (EN 14214), valor mínimo exigido pela ANP e pelo European Committee of Standardization (DOMINGOS et al., 2007; SARIN et al., 2009).

Os valores das características físicas e químicas do óleo de semente de pinhão-manso como os índices de refração, acidez, peróxido, iodo, entre outros, sob diferentes relações de lâminas de água (125%, 100%, 75% e 50% da ETp) nas condições climáticas egípcias, foram estudadas por Kheira e Atta (2009). Os resultados observados pelos autores não revelaram quaisquer diferenças significativas causadas pelos diferentes valores de lâmina de água. Mesmo assim, os autores chegaram à conclusão de que a partir dos resultados obtidos, as melhores características de óleo de semente de pinhão-manso foram registradas com o óleo extraído das plantas que receberam 100% da ETp.

Os resultados obtidos, dos perfis composicionais realizados por cromatografia gasosa dos óleos extraídos de pinhão-manso para os anos agrícolas 2013/14 e 2014/15 encontram-se, respectivamente, nas Tabela 42 e Tabela 43.

Tabela 42 - Perfil composicional dos óleos de pinhão-mansão (%) dos tratamentos avaliados no ciclo 2013/14

Ácidos graxos	Não Irrigado				Irrigado				$\bar{y} \pm s$
	150%N	100%N	50%N	0%N	150%N	100%N	50%N	0%N	
Ácido Palmítico (C16:0)	13,2	13,1	12,7	12,7	13,4	13,2	13,2	12,6	13,0 $\pm$ 0,3
Ác. Palmitoleico (C16:1)	0,8	0,9	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8 $\pm$ 0,05
Ácido Esteárico (C18:0)	5,1	5,1	5,4	5,7	5,4	5,3	5,3	5,2	5,3 $\pm$ 0,2
Ácido Oleico (C18:1)	40,1	39,5	40,8	42,6	40,3	40,7	41,2	39,8	40,6 $\pm$ 0,97
Ácido Linoleico (C18:2)	39,9	39,7	39,3	37,3	39,2	39,3	39,0	40,8	39,3 $\pm$ 0,99
OUTROS	0,9	1,8	1,1	1,0	1,1	0,8	0,7	1,0	0,9 $\pm$ 0,33

$\bar{y}$ = média geral; s = desvio padrão

Tabela 43 - Perfil composicional dos óleos de pinhão-mansão (%) dos tratamentos avaliados no ciclo 2014/15

Ácidos graxos	Não Irrigado				Irrigado				$\bar{y} \pm s$
	150%N	100%N	50%N	0%N	150%N	100%N	50%N	0%N	
Ácido Palmítico (C16:0)	13,0	13,6	13,3	13,4	13,5	13,4	13,5	13,4	13,4 $\pm$ 0,19
Ác. Palmitoleico (C16:1)	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8 $\pm$ 0,06
Ácido Esteárico (C18:0)	5,5	5,5	5,6	5,9	5,5	5,1	5,5	5,4	5,5 $\pm$ 0,22
Ácido Oleico (C18:1)	41,3	37,7	38,9	40,0	37,4	36,4	39,1	38,1	38,6 $\pm$ 1,56
Ácido Linoleico (C18:2)	38,6	40,3	39,3	37,6	40,2	41,0	38,6	39,9	39,4 $\pm$ 1,12
OUTROS	0,9	2,0	2,1	2,3	2,5	3,2	2,5	2,3	2,2 $\pm$ 0,66

$\bar{y}$ = média geral; s = desvio padrão

Com os resultados obtidos, pode-se evidenciar a baixa variação da composição do óleo de pinhão-mansão de acordo com os diferentes tratamentos realizados. A realização da irrigação, com os diferentes níveis de adubação nitrogenada, praticamente não causou alterações na composição do óleo, o que permite prever que, sob ambos os efeitos, a utilização do óleo para a transformação em biodiesel resultará em um biocombustível de características físico-químicas semelhantes, uma vez que a composição dos ácidos graxos não apresenta alteração significativa, resultando em uma mesma quantidade de ésteres metílicos, que são produtos do óleo empregado na reação de transesterificação.

Porém, as características físico-químicas dos óleos provenientes dos tratamentos com irrigação e sem irrigação, com diferentes níveis de adubação nitrogenada, podem se diferenciar, pois a quantidade dos ácidos graxos apresentados nas Tabela 42 e Tabela 43 não especifica por si só, a quantidade de ácidos graxos livres e a quantidade de mono-, di- e triglicerídeos. Isso implica diretamente na escolha da melhor rota de síntese para produção de

biodiesel, já que a presença de ácidos graxos livres representa a acidez do óleo, que inviabiliza a reação de transesterificação alcalina e sugere a esterificação por ácido forte de Lewis (LIMA, 2005).

Como já mencionado anteriormente, a composição de ácidos graxos do pinhão-manso é classificada como um óleo do tipo de ácido oleico ou linoleico, sendo composto de praticamente 4/5 de ácidos graxos insaturados. Para o primeiro ano de avaliação, a porcentagem de ácidos graxos saturados (C16:0 e C18:0) e insaturados (C16:1; C18:1 e C18:2) foram de 18,3 e 80,7%, respectivamente; já no segundo ano, o óleo extraído apresentou em média os valores de 18,9 e 78,9% para os ácidos graxos saturados e insaturados, respectivamente.

Ao avaliarem a resposta do uso do fertilizante NPK na produtividade e na composição de triglicerídeos em pinhão-manso, Akbarian, Modafebehzadi e Bagheripour (2012) encontraram para o nitrogênio altas correlações para produtividade, rendimento de óleo, ácidos graxos insaturados, ácido oleico e ácido esteárico, sendo a correlação entre nitrogênio e produtividade altamente significativa à 1% de significância. Os ácidos graxos insaturados e o ácido palmítico tiveram as menores correlações com a adição de nitrogênio, sendo essas não significativas.

Na Figura 43 são apresentados a composição primária (majoritária) dos ácidos graxos presentes no pinhão-manso e a sua quantidade (%) por meio de análise de ressonância magnética nuclear (RMN ¹H) para cada tratamento, apenas para o primeiro ano de avaliação. Constata-se que, diferente da cromatografia gasosa, o uso da irrigação influenciou significativamente na composição dos ácidos graxos insaturados nas análises de RMN, causando aumento do ácido oleico e diminuição do ácido linoleico; esse último por sua vez, aumentou nos tratamentos em que não havia o suprimento de água por irrigação.

Figura 43 - Quantificação e composição primária dos ácidos graxos do óleo de pinhão-manso para todos os tratamentos avaliados

As diferentes doses de nitrogênio não influenciaram na composição dos ácidos graxos insaturados. Os ácidos oleico e linoleico são os principais ácidos graxos insaturados presentes na constituição do óleo de pinhão-manso (ASHRAFUL et al., 2014). Os resultados encontrados para os tratamentos de sequeiro para ácido linoleico encontram-se muito abaixo do teor médio encontrado na literatura e um pouco acima para o ácido oleico, diferindo dos tratamentos irrigados que se encontraram dentro do padrão médio do óleo de pinhão-manso (AKINTAYO, 2004; ASHRAFUL et al., 2014; BERCHMANS; HIRATA, 2009). Não houve diferença significativa para a composição de ácidos graxos saturados nos tratamentos. Semelhante a esses resultados, Flagella et al. (2002) encontraram na composição de ácidos graxos do óleo de girassol alto oleico, um decréscimo em ácido oleico e esteárico, e um aumento do ácido linoleico e palmítico sob irrigação. Os autores descobriram que sob o efeito da irrigação suplementar e da semeadura precoce, houve um aumento notável na produção de sementes e uma diminuição da razão de ácido oleico/linoleico em genótipos de girassol alto oleico.

Vários podem ser os motivos para a presença da variação dos ácidos graxos primários nas análises de RMN, sendo que as análises de CG não apresentaram nenhum efeito. Apesar de serem oriundos da mesma área experimental, os óleos extraídos são de amostragens

diferentes e pela baixa seleção genética, as plantas da área experimental são passíveis de apresentarem inúmeras expressões fenotípicas e no conteúdo de seu óleo. Os diferentes procedimentos de análise para cada método podem implicar nessa resposta, sem contar que, apesar de ser extremamente preciso, a análise de RMN determina com maior exatidão apenas os componentes primários (majoritários) que provavelmente são os que realmente vão influenciar na qualidade do óleo e do biodiesel produzido. Já a cromatografia gasosa consegue detectar outros ácidos graxos em menor quantidade e com maior precisão no óleo ou no biodiesel produzido.

De acordo com Wang et al. (2012), as matérias-primas para o biodiesel de alta qualidade têm alto teor de ácidos graxos monoinsaturados, pois ésteres metílicos de ácidos graxos monoinsaturados são considerados como sendo melhor do que os poli-insaturados para a matéria-prima de biodiesel de alta qualidade. E de acordo com estes autores, o óleo de pinhão-mansão se enquadra entre as plantas lenhosas que tem as melhores propriedades para um biodiesel de alta qualidade, devido ao conteúdo de ácidos graxos monoinsaturados ser maior do que muitas espécies.

Pensando na resposta fornecida em função da irrigação pela maioria dos índices de qualidade de óleo de pinhão-mansão e na quantificação da composição primária dos ácidos graxos do óleo de pinhão-mansão feito no primeiro ciclo, optou-se por fazer a caracterização descritiva dos índices de qualidade do biodiesel produzido, a partir das amostras de óleo extraídas das sementes coletadas, dos dois experimentos de manejo hídrico (irrigado e sem irrigação), já que a baixa variação da maioria dos índices de qualidade e da própria composição dos ácidos graxos, nas duas metodologias utilizadas nos tratamentos adubados, não chegaria a influenciar no biodiesel produzido. Na Tabela 44 são apresentados os resultados da caracterização do biodiesel produzido a partir das amostras dos tratamentos irrigados e sem irrigação. Por falta de amostra ao final das análises de caracterização, não foi possível fazer as análises de índice de iodo e acidez para a amostra dos tratamentos sem irrigação, ficando impossibilitada a comparação dos resultados dessas duas características, entre os tratamentos irrigado e sem irrigação.

Tabela 44 - Caracterização do biodiesel obtido do óleo de pinhão-manso para os dois experimentos de manejo hídrico

Característica	Irrigado	Não Irrigado	Especificação	Método
Aspecto	LII	LII	(LII) (1)	Visual
Massa Específica a 20°C	877,58	879,11	850,0 a 900,0	ASTM D4052
Viscosidade cinemática a 40°C	4,28	4,64	3,0 a 6,0	ASTM D 445
Teor de Água, mg kg ⁻¹	955,41	857,47	200 – máx.	ASTM D 6304
Ponto de Fulgor, °C	110,5	90,5	100 – mín..	ASTM D 93
Teor de éster	97,58	92,64	95,5 – mín.	EN 14103
Resíduo de Carbono	0,01	0,01	0,050 – máx.	ASTM D 4530
Enxofre Total	3,1	2,6	10 – máx.	ABNT 15553
Sódio + Potássio	<0,1	<0,1	5 – máx.	ABNT 15553
Cálcio + Magnésio	<0,1	<0,1	5 – máx.	ABNT 15553
Fósforo	<0,1	<0,1	10 – máx.	ABNT 15553
Ponto de Entupimento de Filtro a Frio, °C	-1	-2	10 – máx. *	ASTM D 6371
Glicerol Livre	0,0133	0,002	14 – máx. *	
Glicerol Total	0,21	0,92	0,02 – máx.	ASTM D 6584
Monoacilglicerol	0,669	0,918	0,25 – máx.	ASTM D 6584
Diacilglicerol	0,103	1,2541	0,70 – máx.	ASTM D 6584
Triacilglicerol	0,022	4,7057	0,20 – máx.	ASTM D 6584
Estabilidade á Oxidação A 110°C, h	10,87	8,95	8 – min	EM 14112
Corrosividade ao Cobre, 3h a 50°C, máx.	1	1	1	ASTM D 130
Índice de Iodo, g 100 g ⁻¹	104,20	---	Anotar	EN 14111
Índice de Acidez, mg KOH g ⁻¹	<0,1	---	0,50 – máx.	ABNT 14448

(1) Límpido e isento de impurezas

* Limite Máximo, °C – de Janeiro a Abril e de outubro a dezembro 14°C máx. e de Maio a Setembro 10°C máx.

Dentre as características determinadas na caracterização de um biodiesel, algumas podem ser facilmente alteradas com a qualidade da matéria prima utilizada, enquanto que outras estão mais condicionadas aos processos reacionais da produção do biodiesel ou do seu tempo de armazenamento. Com isso, faz-se necessário o conhecimento de cada uma dessas características do biodiesel e de como elas estão mais susceptíveis na alteração da qualidade do biodiesel produzido. Pensando nisso, Monteiro et al. (2008), Lôbo, Ferreira e Cruz (2009) e Quintella et al. (2009), classificaram os métodos analíticos para avaliação da qualidade do biodiesel em quatro grupos, conforme as informações que podem proporcionar, sendo estes: métodos analíticos para determinação de contaminantes provenientes da matéria-prima; métodos analíticos para avaliação do processo produtivo; métodos analíticos para avaliação das propriedades inerentes às estruturas moleculares; e métodos analíticos para monitoramento da qualidade do biodiesel durante o processo de estocagem. Esta classificação ajuda no monitoramento da qualidade do biodiesel, visando métodos analíticos automatizados e que permitam monitoramento remoto em campo e ao longo de toda a cadeia produtiva, priorizando rapidez, simplicidade e baixo custo (QUINTELLA et al., 2009).

As características do processo produtivo (sódio + potássio; glicerina livre; glicerina total; monoacilglicerol, diacilglicerol, triacilglicerol, ponto de fulgor, teor de éster e resíduo de carbono) apesar de apresentarem uma pequena diferença entre os experimentos, se deve às interferências ocorridas no sistema reacional, tais como, tempo de reação, razão molar e temperatura.

Com relação as características relacionadas à matéria prima (cálcio + magnésio, enxofre, fósforo e corrosividade ao cobre), estas não permitem verificar nenhuma diferença significativa entre as duas amostras analisadas. Apesar de estarem relacionadas diretamente ao tipo de matéria prima que chega para a extração, podendo ser alterado com o tipo de manejo adotado no seu cultivo, e nesse caso com os tratamentos aplicados no campo, haveria a necessidade de um maior número de amostras de cada tratamento para verificar uma possível alteração nessas características. O que se observa a partir dos resultados da Tabela 44, é que as duas amostras não tiveram alteração alguma desses parâmetros ou houve muito pouco, como é o caso do enxofre total.

Já para os itens referentes ao processo de armazenamento (teor de água, estabilidade oxidativa e índice de acidez), o teor de água foi diferente significativamente devido à secagem do material pós-reação de transesterificação do óleo em biodiesel. Quanto ao índice de acidez, não foi possível realizar-se comparação devido à ausência do resultado na amostra sem irrigação, já mencionado anteriormente. A estabilidade oxidativa, por sua vez, apresentou uma diferença significativa entre as amostras, e uma das prováveis causas pode ser o fato da quantidade de insaturações entre os tratamentos ser diferente, o que foi constatado nas análises de RMN, lembrando que novas análises precisam ser analisadas para verificar o nível de variabilidade do óleo do pinhão-manso extraído de uma mesma lavoura.

As características referentes as estruturas moleculares (Ponto de Entupimento de Filtro a Frio, viscosidade, massa específica e índice de iodo), foram aquelas que apresentaram as maiores diferenças, em especial, a viscosidade e a massa específica. Pelas diferenças, presume-se que existem pequenas diferenças entre as composições das amostras, o que pode ser afirmado pelos ensaios de cromatografia gasosa realizado nos óleos brutos (perfil composicional). Quanto às outras características, nada pode ser afirmado, em especial ao índice de iodo que não foi quantificado na amostra sem irrigação devido à quantidade de amostra ser insuficiente para essa análise.

Pelos resultados obtidos com as análises de qualidade do óleo nos tratamentos e da caracterização do biodiesel, pode ser afirmado que o pinhão-manso (como única matéria-prima), pode obter-se um biodiesel com qualidade que atenda a todos os parâmetros

estabelecidos pela legislação vigente de acordo com ANVISA (2005) e ANP (2012), haja vista principalmente o atendimento aos ensaios referentes às estruturas moleculares e à estabilidade oxidativa.

5 CONCLUSÕES

- 1) Mesmo sendo adaptado a condições adversas de clima e solo, o pinhão-manso responde positivamente à prática da irrigação complementar e à adubação nitrogenada, chegando a duplicar a produtividade de sementes com a prática da irrigação, e a triplicar, em alguns casos, quando a adubação é feita de acordo com a recomendação proposta pela literatura. A produtividade de água, por sua vez, não apresenta diferença significativa entre os manejos hídricos, ficando restrita apenas para às doses de N aplicadas;
- 2) As variáveis de crescimento (altura da planta, diâmetro e volume de copa e IAF) apresentam uma boa resposta quanto aos tratamentos aplicados. Com as práticas da adubação e da irrigação as folhas permanecem por um maior tempo nas plantas, reduzindo o período de senescência em cada ciclo. O IAF, assim como outras variáveis, apresentam maiores valores para os tratamentos irrigados;
- 3) Todos os teores de clorofila avaliados apresentam maiores valores com a prática da irrigação e com as maiores doses de N aplicadas. No quarto ano de cultivo, como não houve irrigação, os tratamentos com histórico de irrigação não apresentaram diferenças entre os dois manejos hídricos. Apesar da diferença do teor de clorofila entre as doses de N, os tratamentos aplicados apresentaram baixa correlação com o teor de N foliar;
- 4) Os tratamentos aplicados apresentam aumento no rendimento de óleo no cultivo sem irrigação, mas tal condição não é determinante no aumento da produtividade de óleo, com os tratamentos irrigados apresentando maiores produtividades. Com a baixa influência do conteúdo intrínseco de óleo das sementes, o aumento da produtividade de óleo nos tratamentos irrigados se deve principalmente pelo aumento da produtividade de sementes;
- 5) Os índices de qualidade de óleo não apresentam variação significativa quanto às diferentes doses de N, ficando restritos para alguns índices a variação dos valores, apenas com a prática da irrigação para um dos ciclos avaliados.

REFERÊNCIAS

- ABHILASH, P.C.; SRIVASTAVA, P.; JAMIL, S.; SINGH, N. Revisited *Jatropha curcas* as an oil plant of multiple benefits: critical research needs and prospects for the future. **Environment Science & Pollution Research**, Berlin, v. 18, n.1, p.127–131, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-010-0400-5>
- ACHTEN, W.M.J.; MAES, W.H.; REUBENS, B.; MATHIJS, E.; SINGH, V.P.; VERCHOT, L.B.; MUYS, B. Biomass production and allocation in *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 34, p.667–676, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.010>
- ACHTEN, W.M.J.; VERCHOT, L.; FRANKEN, Y.J.; MATHIJS, E.; SINGH, V.P.; AERTS, R.; MUYS, B. *Jatropha* bio-diesel production and use. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.32, n.12, p.1063-1084, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.03.003>
- AKBAR, E.; YAAKOB, Z.; KAMARUDIN, S.K.; ISMAIL, M.; SALIMON, J. Characteristic and composition of *Jatropha curcas* oil seed from Malaysia and its potential as biodiesel feedstock feedstock. **European Journal of Scientific Research**, Victoria, v.29, n.3, p.396-403, 2009.
- AKBARIAN, M.M.; MODAFEHEHZADI, N.; BAGHERIPOUR, M.A. Study of fertilizer (NPK) effects on yield and triglycerides in *Jatropha* (*Jatropha curcas*). **Plant Ecophysiology**, Berlin, v.2, p.169-172, 2012.
- AKINTAYO, E.T. Characteristics and composition of *Parkia biglobbosa* and *Jatropha curcas* oils and cakes. **Bioresource Technology**, Essex, v.92, p.307–310, 2004. [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00197-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00197-4)
- ALBUQUERQUE, F.A.; ARRIEL, N.H.C.; BELTRÃO, N.E.M.; LUCENA, A.M.A.; SOUZA, S.L.; FREIRE, M.A.O.; SAMPAIO, L.R. Análise de crescimento inicial do *Jatropha curcas* em condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v.13, p. 99-106, 2009a.
- ALBUQUERQUE, W.G.; FREIRE, M.A.O.; BELTRÃO, N.E.M.; AZEVEDO, C.A.V. Avaliação do crescimento do pinhão manso em função do tempo, quando submetido a níveis de água e adubação nitrogenada. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v.9, n.2. p.68-73, 2009b.
- ALVES JÚNIOR, J.; ARAUJO, F.J.M.; EVANGELISTA, A.W.P.; CASAROLI, D.; VELLAME, L.M. Distribuição espacial do sistema radicular de plantas de pinhão-manso. **Revista Agrotecnologia**, Anápolis, v.5, n.1, p.50-61, 2014.
- ANDRADE, G.A.; CARAMORI, P.H.; SOUZA, F.S.; MARUR, C.J.; RIBEIRO, A.M.A. Temperatura mínima letal para plantas jovens de Pinhão - Manso. **Bragantia**, Campinas, v. 67, p. 799-803, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052008000300031>

ANDRÉO-SOUZA, Y.; PEREIRA, A.L.; SILVA, F.F.S.; RIEBEIRO-REIS, R.C.; EVANGELISTA, M.R.V.; CASTRO, R.D.; DANTAS, B.F. Efeito da salinidade na germinação de sementes e no crescimento inicial de mudas de pinhão-manso. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v.32, n.2, p.83-92, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-31222010000200010>

ANGARITA, E.E.Y.; ROCHA, M.H.; LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J.; TORRES, E.A.; ALVES, C.T.; GIRALDO, S.Y. Biocombustíveis de Primeira Geração: Biodiesel. In: LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J. (Org.). **Biocombustíveis**. 1ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, v.1, p.173-310, 2012.

ANGELUCCI, E.; CARVALHO, L.R.; CARVALHO, N.R.P.; FIGUEIREDO, B.I.; MANTOVANI, B.M.D.; MORAES, M.R. **Análise química de alimentos**: Campinas, 1987. 123p. (Manual Técnico).

ANJUM, S.A.; XIE, X.; WANG, L.C.; SALEEM, M.F.; MAN, C.; LEI, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 6, p. 2026-2032, 2011.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução N° 14, de 11/05/2012, Estabelece a especificação do biodiesel a ser comercializado pelos diversos agentes econômicos autorizados em todo o território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18/05/2012, Seção 1, p. 79, 2012.

ANVISA. Resolução n. 270, de 22 de setembro de 2005, Regulamento técnico para óleos vegetais, gorduras vegetais e creme vegetal. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Diário Oficial da União**, Brasília, p. 2134, 2005.

ANVISA. Resolução nº 482, de 23 de setembro de 1999, Regulamento técnico para fixação de identidade e qualidade de óleos e gorduras vegetais, **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, p. 82 - 87, 1999.

AOCS. **Official methods and recommended practices of the American Oil Chemistry Society**. 5ed. Champaign, 2003.

ARRUDA, F.P.; BELTRÃO, N.E.M.; ANDRADE, A.P.; PEREIRA, W.E.; SEVERINO, L.S. Cultivo de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. **Revista de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 8, p. 789-799, 2004.

ASHRAFUL, A.M.; MASJUKI, H.H.; KALAM, M.A.; RIZWANUL FATTAH, I.M.; IMTENAN, S.; SHAHIR, S.A.; MOBARAK, H.M. Production and comparison of fuel properties, engines performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: a review. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v.80, p.202-228, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.037>

AUGUSTUS, G.D.P.S.; JAYABALAN, M.; SEILER, G.J. Evaluation and bioinduction of energy components of *Jatropha curcas*. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.23, p.161-164, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00044-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00044-2)

BACCAN, N.; ANDRADE, J.C.; GODINHO, O.E.S.; BARONE, J.S. Práticas de laboratório. In: BACCAN, N.; ANDRADE, J.C.; GODINHO, O.E.S.; BARONE, J.S. **Química analítica elementar**. Campinas: Unicamp, 1985. p.154-212.

BANZATTO, D.A.; KRONKA, S.N. **Experimentação agrícola**. 4.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2008. 237p.

BARBIERI JÚNIOR, E. **Características estruturais, teores de clorofila e suas relações com o nitrogênio foliar e a biomassa em capim-Tifton 85**. 2009. 64p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2009. Disponível em: <<http://r1.ufrj.br/wp/ppgz/files/2015/05/111-Disserta%C3%A7%C3%A3o-%C3%89lio-Barbieri-04-03-09.pdf>>. Acesso em: 25 fev.2015.

BARISON, A.; SILVA, C.W.P.; CAMPOS, F.R.; SIMONELLI, F.; LENZ, C.A.; FERREIRA, A.G. A simple methodology for the determination of fatty acid composition in edible oils through ¹H NMR spectroscopy. **Magnetic Resonance in Chemistry**, Chichester, v.48, p.642-650, 2010. <http://dx.doi.org/10.1002/mrc.2629>

BARROS JÚNIOR, G.; GUERRA, H.O.C.; CAVALCANTI, M.L.F.; LACERDA, R.D. Consumo de água e eficiência do uso para duas cultivares de mamona submetidas a estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.4, p.350-355, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000400003>

BEHERA, S.K.; SRIVASTAVA, P.; TRIPATHI, R.; SINGH, J.P.; SINGH, N. Evaluation of plant performance of *Jatropha curcas* L. under different agro-practices for optimizing biomass – A case study. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.34, n.1, p.30–41, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.008>

BELTON, P.S.; DELGADILLO, I.; HELMES, E.; NICHOLSON, J.K.; SPRAUL, M. Use of high-field ¹H NMR spectroscopy for the analysis of liquid food. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v.44, p.1483-1487, 1996. <http://dx.doi.org/10.1021/jf950640z>

BELTRÃO, N.E.M.; OLIVEIRA, M.I.P. **Oleaginosas e seus óleos: Vantagens e Desvantagens para Produção de Biodiesel**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008. 30p. (Documentos, 201).

BERCHMANS, H.J.; HIRATA, S. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. **Bioresource Technology**, Essex, v.99, p.1716-1721, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.051>

BERTHOUEX, P.M.; BROWN, L.C. **Statistics for environmental engineers**. 2nd ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 2002. 119p.

BERTI, M.T.; JOHNSON, B.L. Physiological changes during seed development of cuphea. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.106, p.163-170, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2007.11.007>

BHERING, L.L.; LAVIOLA, B.G.; SALGADO, C.C.; SANCHEZ, C.F.B.; ROSADO, T.B.; ALVES, A.A. Genetic gains in physic nut using selection indexes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, p.402-408, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000300012>

BIODIESELBR. Propriedades Físicas da *Jatropha curcas*/Pinhão Manso. 2011. BiodieselBR Online Ltda. Disponível em: < <http://www.pinhaomanso.com.br/propiedades.html> >. Acesso em: 17dez.2015.

BOX, G.E.P. Non-normality and tests on variance. **Biometrika**, London, v.40, n.4, p.318-335, 1953.

BREEN, A.N.; RICHARDS, J.H. Irrigation and fertilization effects on seed number, size, germination and seedling growth: implications for desert shrub establishment. **Oecologia**, Berlin, v.157, n.1, p.13-19, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-008-1049-3>

BRUM, A.A.S.; ARRUDA, L.F.; REGITANO-D'ARCE, M.A.B. Métodos de extração e qualidade da ração lipídica de matérias-primas de origem vegetal e animal. **Química Nova**, São Paulo, v.32, n.4, p.849-854, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422009000400005>

CAMARGOS, R.R.S. **Avaliação da viabilidade de se produzir biodiesel através de transesterificação de óleo de grãos de café defeituosos**. 2005. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/CMPS-6VEGCG/disserta_o_de_mestrado_rodrigo_ribeiro.pdf;jsessionid=07C1B3EE1145801D08B950A245AE2B6E?sequence=1>. Acesso em: 05 dez.2015.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; NICOLODI, R. Avaliação temporal da umidade do solo como consequência do tipo e percentagem de cobertura vegetal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 24, n.3, p. 459-463, 1994. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84781994000300002>

CARNIELLI, F. O combustível do futuro. 2003. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/boletim/bol1413/quarta.shtml>>. Acesso em: 03 jun.2013.

CARROLL, A.B.; PALLARDY, S.G.; GALEN, C. Drought stress, plant water status, and floral trait expression in fireweed, *Epilobium angustifolium* (Onagraceae). **American Journal Botany**, Saint Louis, v.88, n.3, p.438-446, 2001.

CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2000. 588p.

CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. 2ed. Campinas: UNICAMP, 2003. 207p.

CEPAGRI - CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: < http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_436.html >. Acesso em: 13 jun.2013.

CESTARI, A.A.; COSTA, S.C.; MINHO, A.P. Análise de dados longitudinais em experimentação animal. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.33, n.4, p.1565-1580, 2012. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n4p1565>

CHAUDHARY, D.R.; SAXENA, J.; LORENZ, N.; DICK, L.K.; DICK, R.P. Microbial profiles of Rhizosphere and bulk soil microbial communities of biofuel crops Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and Jatropha (*Jatropha curcas* L.). **Applied and Environmental Soil Science**, London, v.1, p.1-6, 2012. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/906864>

CHAVES, L.H.G.; GHEYI, H.R.; RIBEIRO, S. Consumo de água e eficiência do uso para cultivar de mamona Paraguaçu submetida à fertilização nitrogenada. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 8, p. 126-133, 2011.

CHAVES, L.H.G.; SILVA CUNHA, T.H.C.; BARROS JUNIOR, G.; LACERDA, R.D.; DANTAS JUNIOR, E.E. Zinco e cobre em pinhão manso. 1. Crescimento inicial da cultura. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.22, n.3, p.94-99, 2009.

CORRÊA, S.M.; ARBILLA, G. Aromatic hydrocarbons emissions in diesel and biodiesel exhaust. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.40, p.6821-6826, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.068>

DAGAR, J.C.; TOMAR, O.S.; KUMAR, Y.; BHAGWAN, H.; YADAV R.K.; TYAGI, K. Performance of some under-explored crops under saline irrigation in a semiarid climate in Northwest India. **Land Degradation & Development**, Chichester, v.3, n.17, p.285-299, 2006. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.712>

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Elementos essenciais e benéficos às plantas superiores. In: FERNANDES, M.S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.1-5.

DEGANI, A.L.G.; CASS, Q.B.; VIEIRA, P.C. Cromatografia: um breve ensaio. **Química Nova na Escola**, São Paulo, n.7, p.21-25, 1998.

DEUS, F.P.; FARIA, M.A.; OLIVEIRA, E.L.; CASTRO NETO, P. Jatropha seed oil content and yield under different irrigation and potassium fertilization levels. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, p.1089-1096, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000600010>

DIAS, L.A.S.; LEME, L.P.; LAVIOLA, B.G.; PALLINI FILHO, A.; PEREIRA, O.L.; CARVALHO, M.; MANFIO, C.E.; SANTOS, A.S.; SOUSA, L.C.A.; OLIVEIRA, T.S.; DIAS, D.C.F.S. **Cultivo de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) para produção de óleo combustível**. Viçosa: UFV, 2007. v.1, 40p.

DOMINGOS, A.K.; SAAD, E.B.; VECHIATTO, W.W.D.; WILHELM, H.M.; RAMOS, L.P. The influence of BHA, BHT and TBHQ on the oxidation stability of soybean oil ethyl esters (biodiesel). **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v.18, n.2, p.416-423, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-50532007000200026>

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

DRUMOND, M.A.; ANJOS, J.B.; PAIVA, L.E.; MORGADO, L.B.; REIS, E.M. Produção de pinhão manso no Semi-árido brasileiro. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE AGROENERGIA E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2007, Teresina; Congresso Internacional de Agroenergia e Biocombustíveis, Teresina. **Anais...** Embrapa Meio Norte, 2007.

DRUMOND, M.A.; SANTOS, C.A.F.; OLIVEIRA, V.R.; MARTINS, J.C.; ANJOS, J.B.; EVANGELISTA, M.R.V. Desempenho agrônômico de genótipos de pinhão manso no Semiárido pernambucano. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.1, p. 44-47, 2010.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009005000229>

DUARTE, D.M.; GUIMARÃES, G.R.; TORRES JUNIOR, H.D.; PEREIRA, F.S.; NEVES, T.G.; MATOS, F.S. Growth of *J. curcas* seedlings under water deficit condition. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.31, p.1618-1623, 2015. <http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v31n6a2015-26307>

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives**. 2.nd ed. Sunderland, MA: Sinauer, 2005.400p.

EVERSON, C.S.; MENGISTU, M.G.; GUSH, M.B. A field assessment of the agronomic performance and water use of *Jatropha curcas* in South Africa. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.59, p.59-69, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.013>

FACT FOUNDATION. **THE JATROPHA HANDBOOK**: From cultivation to application. Eindhoven, 174 p. 2010. Disponível em: < http://fact-foundation.com/sites/default/files/library/documents/54_the_jatropha_handbook.pdf >. Acesso em: 04 abril2013.

FAHL, J.I.; CARELLI, M.L.C.; VEGA, J.; MAGALHÃES, E.A.C. Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (*Coffea Arabica* L.). **Journal of Horticultural Science**, London, v.69, n.1, p.161-169, 1994.
<http://dx.doi.org/10.1080/14620316.1994.11515262>

FARIA, M.A.; EVANGELISTA, A.W.P.; MELO, P.C.; ALVES JUNIOR, J. Resposta da cultura de pinhão-manso à irrigação e à adubação com OMM-Tech. **Irriga**, Botucatu, v.16, p.70-81, 2011. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2011v16n1p70>

FAIRLESS, D. Biofuel: the little shrub that could-maybe. **Nature**, London, v.449, p.652-655, 2007. <http://dx.doi.org/10.1038/449652a>

FERNANDEZ, G.C.J. Repeated measure analysis of line-source sprinkler experiments. **HortScience**, Alexandria, v.26, n.4, p.339-342, 1991.

FERNÁNDEZ, S.; VIDAL, D.; SIMÓN, E.; SUGRAÑES, L. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstone, v.15, p.1867-1884, 1994.
<http://dx.doi.org/10.1080/01431169408954213>

FLAGELLA, Z.; ROTUNNO, T.; TARANTINO, E.; DI CATERINA, R.; DE CARO, A. Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. **European Journal of Agronomy**, Oxford, v. 17, p. 221-230, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00012-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00012-6)

FLUMIGNAN, D.L. **Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.)**. 2011. 200p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-23032012-103447/> >. Acesso em: 14 jun.2013.

FLUMIGNAN, D.L.; OLIVEIRA, J.E.; HATANAKA, R.R.; SEQUINEL, R. Avanços Brasileiros no Desenvolvimento de Normas Técnicas Analíticas para Certificação e Controle da Qualidade de Biodiesel. In: LEMOS, E.G.M.; STRADIOTTO, N.R. (Org.). **Bioenergia - Desenvolvimento, Pesquisa e Inovação**. 1ed. São Paulo SP: Editora Unesp - Cultura Acadêmica, 2012, v.1, p.889-943.

FOIDL, N.; FOIDL, G.; SANCHEZ, M.; MITTELBACH, M.; HACKEL S. *Jatropha curcas* L. as a source for production of biofuel in Nicaragua. **Bioresource Technology**, Essex, v.58, n.1, p.77-82, 1996. [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(96\)00111-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(96)00111-3)

FONTES, P.C.R. **Nutrição Mineral de Plantas: avaliação e diagnose**. Viçosa: Arka, 2011. 296p.

FRANCIS, G.; EDINGER, R.; BECKER, K. A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. **Natural Resource Forum**, New York, v.29, p.12-24, 2005. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-8947.2005.00109.x>

FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Aproveitamento pela cana-de-açúcar da adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2763-2770, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000700021>

FREIBERGER, M.B. **Crescimento inicial e nutrição do pinhão manso em função da adubação NPK**. 2012. 68p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2012. Disponível em: < <http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0779.pdf> >. Acesso em: 23jul.2013.

FRIZZONE, J.A. Eficiência e Uniformidade da Irrigação: Possibilidades técnicas e econômicas para a melhoria. In: FRIZZONE, J.A.; LIMA, S.C.R.V.; COSTA, R.N.T. (Org.). **Irrigação: da conservação de água e solo à sustentabilidade com vistas à autogestão**. 1ed. Fortaleza: INOVAGRI, v.1, p.36-82, 2014.

FUKUDA, H.; KONDO, A.; NODA, H. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, Osaka, v.92, n.5, p.405-406, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1723\(01\)80288-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1723(01)80288-7)

GEBER, M.A.; DAWSON, T.E. Genetic variation in and correlation between leaf gas exchange, morphology, and development in *Polygonum arenastrum*, an annual plant. **Oecologia**, Berlin, n.2, v.85, p.153-158, 1990. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00319396>

GINWAL, H.S.; PHARTYAL, S.S.; RAWAT, P.S.; SRIVASTAVA, R.L. Seed source variation in morphology, germination and seedling growth of *Jatropha curcas* Linn., in Central India. **Silvae Genetica**, Frankfurt, v. 54, p. 76–80, 2005.

GOMES, M.M.R. **Produção de biodiesel a partir da esterificação dos ácidos graxos obtidos por hidrólise de óleo de peixe**. 2009. 76p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: < <http://tpqb.eq.ufrj.br/download/biodiesel-de-oleo-residual-de-peixe.pdf> >. Acesso em: 06 dez.2015.

GUIMARÃES, A.S.; SANTOS, N.R.; BELTRÃO, N.E.M. Fontes e doses crescentes de adubos orgânicos e mineral no crescimento inicial do pinhão manso. **Mens agitat**, Boa Vista, v.4, p.21-28, 2009.

HAAS, W.; MITTELBAACH, M. Detoxification experiments with the seed oil from *Jatropha curcas* L. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.12, p. 11-118, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-6690\(00\)00043-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-6690(00)00043-1)

HANCOCK, J.E.; LOYA, W.M.; GIARDINA, C.P.; LI, L.; CHIANG, V.L.; PREGITZER, K.S. Plant growth, biomass partitioning and soil carbon formation in response to altered lignin biosynthesis in *Populus tremuloides*. **New Phytologist**, Cambridge, v.173, n.4, p.1469-8137, 2007. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01965.x>

HATFIELD, J.L.; SAUER, T.J.; PRUEGER, J.H. Managing Soils to Achieve Greater Water Use Efficiency: A Review. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, n.2, p.271-280, 2001. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2001.932271x>

HATHURUSINGHA, S.; ASHWATH, N.; MIDMORE, D. Periodic variation in kernel oil content and fatty acid profiles of *Calophyllum innophyllum* L.: a potential biodiesel feedstock in Australia. **Biomass Bioenergy**, Oxford, v.35, n.8, p.3448-3452, 2011. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.biombioe.2011.04.014>

HELLER, J. **Physic nut: *Jatropha curcas* L.**: Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. Rome: Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, 1996. 66p.

HENNING, R.K. Combating desertification: The *Jatropha* Project of Mali, West Africa. **Arilands Newsletter**, Weissenberg, n.40, 1996. Disponível em: < <http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln40/jatropha.html> >. Acesso em: 17ago.2014.

HORSCHUTZ, A.C.O.; TEIXEIRA, M.B.; ALVES, J.M.; SILVA, F.G.; SILVA, N.F. Crescimento e produtividade do pinhão-mansão em função do espaçamento e irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, p.1093-1099, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012001000009>

IBAÑEZ, E., CIFUENTES, A. New analytical techniques in food science. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Boca Raton, v.41, n.6, p.413-450, 2001. <http://dx.doi.org/10.1080/20014091091878>

IYAMA, M.; NEWMAN, D.; MUNSTER, C.; NYABENGE, M.; SILESHI, G.; MORAA, V.; ONCHIEKU, J.; MOWO, J.G.; JAMNADASS, R. Productivity of *Jatropha curcas* under smallholder farm conditions in Kenya. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v.87, n.4, p.729-746, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-012-9592-7>

ÍNDIA. Report of the committee on development of biofuels, Planning Commission, Government of India. New Delhi, 214 p. 2003. Disponível em: < http://planningcommission.nic.in/reports/genrep/cmtt_bio.pdf >. Acesso em: 04/12/2015.

IUPAC - INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. **Standard methods for the analysis of oils, fats and derivatives**. 6th ed. Oxford, 1979. 71p.

JALEEL, C. A.; MANIVANNAN, P.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agriculture and Biology**, Faisalabad, v.11, p.100-105, 2009.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. 6th ed. New York: Prentice Hall, 2007. 773p.

JONGSCHAAP, R.E.E.; CORRÉ, W.J.; BINDRABAN, P.S.; BRANDENBURG, W.A. Claims and Facts on *Jatropha curcas* L.: Global *Jatropha curcas* evaluation, breeding and propagation programme. **Plant Research International, Report 158**, Wageningen, 66 p. 2007. Disponível em: < http://www.agmrc.org/media/cms/Claims_and_facts_on_Jatropha_curcas_9F569A2097292.pdf >. Acesso em: 9 mar,2016.

KABIR, E.; HUSSAIN, D.; KIM, K.H. Prospects for biodiesel production from *Jatropha curcas*: a case study of Bangladesh Agricultural University Farm. **International Journal of Green Energy**, Philadelphia, v.6, n.4, p.381-391, 2009. <http://dx.doi.org/10.1080/15435070903107064>

KAGAMEBGA, W.F.; THIOMBIANO, A.; TRAORÉ, S.; ZOUGMORE, R.; BOUSSIM, J.I. Survival and growth responses of *Jatropha curcas* L. to three restoration techniques on degraded soils in Burkina Faso. **Annals of Forest Research**, Ilfov, v.54, n.2, p.171-184, 2011.

KALANNAVAR, V.N. **Response of *Jatropha curcas* to nitrogen phosphorus and potassium levels in Northern transition zone of Karnataka**. 2008. 109p. Thesis (Master in Agronomy) - University of Agricultural Sciences, Dharwad, 2008.

- KANT, P.; WU, S. The extraordinary collapse of *Jatropha* as a global biofuel. **Environmental Science and Technology**, Washington, v.45, p.7114-7115, 2011. <http://dx.doi.org/10.1021/es201943v>
- KAUSHIK, N.; BHARDWAJ, D. Screening of *Jatropha curcas* germplasm for oil content and fatty acid composition. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.58, p.210-218, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.010>
- KAUSHIK, N.; KUMAR, K.; KUMAR, S.; KAUSHIK, N.; ROY, S. Genetic variability and divergence studies in seed traits and oil content of *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) accessions. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.31, n.7, p.497-502, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.021>
- KERBAUY, G.B. **Fisiologia vegetal**. 2ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. 431p.
- KESAVA RAO, A.V.R.; WANI, S.P.; SINGH, P.; SRINIVAS, K.; RAO, C.S. Water requirement and use by *Jatropha curcas* in a semi-arid tropical location. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.39, p.175-181, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.013>
- KHEIRA, A.A.A.; ATTA, N.M.M. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficit: yield, water use efficiency and oilseed characteristics. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.33, n.10, p.1343-1350, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.05.015>
- KING, E.G.; STANTON, M.L. Facilitative effect of *Aloe* shrubs on grass establishment, growth, and reproduction in degraded Kenyan rangelands: implications for restoration. **Restoration Ecology**, Malden, v.16, p.464-474, 2008. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00310.x>
- KPOVIESSI, D.S.S.; MOUDACHIROU, M.; SOUMANOU, M.M.; KOSSOUOH, C.; ACCROMBESSI, G.C. Propriétés physico-chimiques et composition de l'huile non conventionnelle de pourghère (*Jatropha curcas*) de différentes régions du Bénin. **Comptes Rendus Chimie**, Amsterdam, v.7, p.1007-1012, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crci.2003.10.021>
- KRISHNAMURTHY, L.; ZAMAN-ALLAH, M.; MARIMUTHU, S.; SUSHA, P.; WANI, A.V.R.; RAO, K. Root growth in *Jatropha* and its implications for drought adaptation. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.39, p.247-252, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.015>
- KUMAR, S.; CHAUBE, A.; JAIN, K.S. Sustainability issues for promotion of *Jatropha* biodiesel in Indian scenario: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Amsterdam, v.16, n.2, p.1089-1098, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.014>
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. 531p.
- LAVIOLA, B.G.; BHERING, L.L.; MENDONÇA, S.; ROSADO, T.B.; ALBRECHT, J.C. Caracterização morfo-agronômica do banco de germoplasma de pinhão-mansão na fase jovem. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.27, p.371-379, 2011.

LAVIOLA, B.G.; DIAS, L.A.S. Teor e acúmulo de nutrientes em folhas e frutos de pinhão manso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.5, p.1969-1975, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000500018>

LAVIOLA, B.G.; MARTINEZ, H.E.P.; SOUZA, R.B.; ALVAREZ, V.H. Dinâmica de N e K em folhas, flores e frutos de cafeeiro arábico em três níveis de adubação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.22, n.3, p.33-47, 2006.

LAVIOLA, B.G.; ROSADO, T.B.; BHERING, L.L.; KOBAYASHI, A.K. ; RESENDE, M.D.V. Genetic parameters and variability in physic nut accessions during early developmental stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.10, p.1117-1123, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010001000010>

LAVIOLA, B.G.; SILVA, S.D.A.E.; JUHASZ, A.C.P.; ROCHA, R.B.; OLIVEIRA, R.J.P.; ALBRECHT, J.C.; ALVES, A.A.; ROSADO, T.B. Desempenho agrônômico e ganho genético pela seleção de pinhão-manso em três regiões do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.49, n.5, p.356-363, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014000500005>

LENA, B.P. **Consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) irrigado e sem irrigação na fase de formação**. 2013. 68p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-18072013-104451/> >. Acesso em: 13 out.2013.

LI, Z.; LIN, B.L.; ZHAO, X.; SAGISAKA, M.; SHIBAZAKI, R. System approach for evaluating the potential yield and plantation of *Jatropha curcas* L. on a global scale. **Environmental Science and Technology**, Easton, v.44, n.6, p.2204–2209, 2010. <http://dx.doi.org/10.1021/es903004f>

LIANG, Y. CHEN, H.; TANG, M.J.; YANG, P.F.; SHEN, S.H. Responses of *Jatropha curcas* seedlings to cold stress: photosynthesis-related proteins and chlorophyll fluorescence characteristics. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.131, n.3, p.508-517, 2007. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.00974.x>

LIMA, J.R.O. **Síntese e caracterização físico-química, térmica e espectroscópica de biodiesel de babaçu (*Orbignya* sp.), tucun (*Astrocaryum vulgare*), macaúba (*Acrocomia aculeata*) e soja (*Glycine max*) por rota alcalina metílica e etílica**. 2005. 109p. Dissertação (Mestrado em Química) – Centro de Ciências da Natureza, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2005.

LIMA, R.L.S.; SEVERINO, L.S.; CAZETTA, J.O.; AZEVEDO, C.A.V.; SOFIATTI, V.; ARRIEI, N.H.C. Posição da folha e estágio fenológico do ramo para análise foliar do pinhão-manso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.10, p.1068-1072, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011001000011>

LIMA, S.C.R.V.; FRIZZONE, J.A.; MATEOS, L.; FERNANDEZ, M.S. Desempenho da irrigação em um projeto hidroagrícola no sul da Espanha: metodologia para análise da eficiência de uso da água. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.2, p.59-77, 2010.

LÔBO, I.P.; FERREIRA, S.L.C.; CRUZ, R.S. Biodiesel: Parâmetros de Qualidade e Métodos Analíticos. **Química Nova**, São Paulo, v.32, n.6, p.1596-1608, 2009.

<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422009000600044>

LUTTGE, U.; KLUGE, M.; BAUER, G. **Botanique**: traité fondamental. Trad. de V.A. Sieffert. Paris: Lavoisier, Tec & Doc., 1996. 588p.

LUTTGE, U. Stem Cam in arborescent succulents. **Trees: structure and function**, Berlin, v.22, p.139-148, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-007-0198-z>

MAES, W.H.; ACHTEN, W.M.J.; REUBENS, B.; RAES, D.; SAMSON, R.; MUYS, B. Plant-water relationships and growth strategies of *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. **Journal of Arid Environments**, London, v.73, n.10, p.877-884, 2009a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.04.013>

MAES, W.H. TRABUCCO, A.; ACHTEN, W.M.J.; MUYS, B. Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.33, n.10, p.1481-1485, 2009b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.06.001>

MAKKAR, H.P.S.; BECKER, K.; SPORER, F.; WINK, M. Studies on nutritive potential and toxic constituents of different provenances of *Jatropha curcas*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v.45, n.8, p.3152-3157, 1997. <http://dx.doi.org/10.1021/jf970036j>

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do Estado Nutricional das Plantas**: princípios e aplicações. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba, 1997. 319p.

MARQUES, D.A. **Pinhão manso para produção de biodiesel: um promissor negócio ou um grande desastre**, 2007. Disponível em: < <http://www.apta.sp.gov.br/noticias.php?id=2709> >. Acesso em: 16 nov.2015.

MARRUGO-NEGRETTE, J.; DURANGO-HERNÁNDEZ, J.; PINEDO-HERNÁNDEZ, J.; OLIVERO-VERBEL, J.; DÍEZ, S. Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*. **Chemosphere**, Oxford, v.127, p.58-63, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.073>

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889p.

MARTÍNEZ-FERRI, E.; MANRIQUE, E.; VALLADARES, F.; BALAGUER, L. Winter photoinhibition in the field involves different processes in four co-occurring Mediterranean tree species. **Tree Physiology**, Oxford, v.24, p.981-990, 2004.

- MARTÍNEZ-HERRERA, J.; SIDDHURAJU, P.; FRANCIS, G.; DÁVILA-ORTÍZ, G.; BECKER, K. Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. **Food Chemistry**, London, v.96, p.80-89, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.059>
- MARTINS, C.C.; MACHADO, C.G.; CAVASINI, R. Temperaturas e substrato para o teste de germinação de sementes de pinhão-mansão. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.32, n.3, p.863–868, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542008000300024>
- MATOS, F.S.; GAMBOA, I.; RIBEIRO, R.P.; MAYER, M.L.; NEVES, T.G.; LEONARDO, B.R.L.; SOUZA, A. C. Influência da intensidade luminosa no desenvolvimento de mudas de *Jatropha curcas* L. **Agrarian**, Dourados, v.4, n.14, p.265-272, 2011.
- MATOS, F.S.; MOREIRA, C.V.; MISSIO, R.F.; DIAS, L.A.S. Caracterização fisiológica de mudas de *Jatropha curcas* L. produzidas em diferentes níveis de irradiância. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, Tunja, v.3, n.1, p.126-134, 2009. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2009v3i1.1204>
- MATSUMOTO, K.; OHTA, T.; TANAKA, T. Dependence of stomatal conductance on leaf chlorophyll and meteorological variables. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.132, n.1/2, p.44-57, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.001>
- MAUCHLY, J.W. Significance test for sphericity of a normal n-variate distribution. **Annals of Mathematical Statistics**, Ann Arbor, v.11, n.2, p.204-209, 1940. <http://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177731915>
- MEDEIROS, H.R.; DUBEUX JUNIOR, J.C.B. Efeitos da fertilização com nitrogênio sobre a produção e eficiência do uso da água em capim buffel. **Caatinga**, Mossoró, v.21, n.3, p.13-15, 2008.
- MELO, P.G. “Produção e caracterização de biodieseis obtidos a partir da oleaginosa macaúba (*Acrocomia aculeata*)”. 2012. 80p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/3103>>. Acesso em: 06 dez.2015.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of Plant Nutrition**. 5th ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849p.
- METCALFE, D.B.; MEIR, P.; ARAGÃO, L.E.O.C.; COSTA, A.C.L.; BRAGA, A.P.; GONÇALVES, P.H.L.; SILVA JÚNIOR, J.A.; ALMEIDA, S.S.; DAWSON, L.A.; MALHI, Y.; WILLIAMS, M. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. **Plant and Soil**, The Hague, v.311, n.1, p.189-199, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-008-9670-9>
- MITTELBAACH, M.; REMSCHMIDT, C. **Biodiesel – the comprehensive handbook**. Vienna: Martin Mittelbach, 2004. 332p.
- MOHAPATRA, S.; PANDA, P.K. 2011. Effects of fertilizer application on growth and yield of *Jatropha curcas* L. in an Aeris Tropaequet of Eastern India. **Notulae Scientia Biologicae**, Cluj-Napoca, v.3, n.1, p.95-100, 2011.

MONTEIRO, M.R.; AMBROZIN, A.R.P.; LIÃO, L.M.; FERREIRA, A.G. Critical review on analytical methods for biodiesel characterization, **Talanta**, London, v.77, n.2, p.593-605, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2008.07.001>

MORETTO, E; FETT, R. **Tecnologia de óleos Vegetais e Gorduras Vegetais na Indústria de Alimentos**. São Paulo: Editora Varela, 1998. 150p.

MÜLLER, M.D.; PACIULLO, D.S.C.; MARTINS, C.E.; ROCHA, W.S.D.; CASTRO, C.R.T. Desenvolvimento vegetativo de pinhão-mansão em diferentes arranjos de plantio em sistemas agrossilvipastoris. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.49, n.7, p.506-514, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014000700002>

NERY, A.R.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, M.B.R.; FERNANDES, P.D.; CHAVES, L.H.G.; DANTAS NETO, J.; GHEYI, H.R. Crescimento do pinhão-mansão irrigado com águas salinas em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.5, p.551-558, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000500007>

NIELSEN, D.C.; HALVORSON, A.D. Nitrogen fertility influence on water stress and yield of winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v.83, n.6, p.1065-1070, 1991. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300060025x>

NUNES, C.F.; SANTOS, D.N.; PASQUAL, M.; VALENTE, T.C.T. Morfologia externa de frutos, sementes e plântulas de pinhão-mansão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.2, p.207-210, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000200014>

NÚÑEZ-COLÍN, C.A.; GOYTIA-JIMÉNEZ, M.A. Distribution and agroclimatic characterization of potential cultivation regions of physic nut in Mexico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.9, p.1078-1085, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000900002>

OGUNWOLE, J.O., CHAUDHARY, D.R., GHOSH, A., DAUDU, C.K., CHIKARA, J., PATOLIA, J.S. Contribution of *Jatropha curcas* to soil quality improvement in a degraded Indian entisol. **Acta Agriculturae Scandinavica**, Copenhagen, v.58, n.3, p.245-251, 2008. <http://dx.doi.org/10.1080/09064710701628925>

OLIVEIRA, E.L.; FARIA, M.A.; EVANGELISTA, A.W.P.; MELO, P.C. Resposta do pinhão-mansão à aplicação de níveis de irrigação e doses de adubação potássica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.6, p.539-598, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000600001>

OLIVEIRA, S.J.C.; BELTRÃO, N.E.M. Crescimento do pinhão manso (*Jatropha curcas*) em função da poda e da adubação química. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v.14, n.1, p.09-17, 2010.

OLIVEIRA, S. J. C. **Componentes de crescimento do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) em função da poda e adubação química**. 2009. 126p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2009. Disponível em: < <http://www.cca.ufpb.br/ppga/pdf/doutorado/Suenildo%20Josemo-dr09.pdf> >. Acesso em: 02 jul.2015.

ONG, H.C.; SILITONGA, A.S.; MASJUKI, H.H.; MAHLIA, T.M.I.; CHONG, W.T.; BOOSROH, M.H. Production and comparative fuel properties of biodiesel from non-edible oils: *Jatropha curcas*, *Sterculia foetida* and *Ceiba pentandra*. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v.73, p.245-255, 2013.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.011>

OPENSHAW, K. A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.19, n.1, p.1-15, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00019-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00019-2)

PANDEY, V.C.; SINGH, K.; SINGH, J.S.; KUMAR, A.; SINGH, B.; SINGH, R.P. *Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v.16, n.5, p.2870-2883, 2012.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.004>

PATOLIA, J.S.; GHOSH, A.; CHIKARA, J.; CHAUDHARY, D.R.; PARMAR, D.R.; BHUVA, H.M. **Response of *Jatropha curcas* grown on wasteland to N and P fertilization**. Expert seminar on *Jatropha curcas* L. Agronomy and Genetics, 26-28 March 2007. Published by FACT Foundation, Wageningen, The Netherlands, 2007. Disponível em: <

http://www.jatropha.pro/PDF%20bestanden/4.%20NP%20fertilizer%2026.03.07_lr.pdf >

Acesso em: 11mar.2016.

PECINA-QUINTERO, V.; ANAYA-LOPEZ, J.L.; ZAMARRIPA-COLMENERO, A.; NUNEZ-COLIN, C.A.; MONTES-GARCIA, N.; SOLIS-BONILLA, J.L.; JIMENEZ-BECERRIL, M.F. Genetic structure of *Jatropha curcas* L. in Mexico and probable centre of origin. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.60, p.147-155, 2014.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.005>

PEIXOTO, A.R. **Plantas oleaginosas arbóreas**. São Paulo: Nobel, 1973. 282p.

PEIXOTO, L.A.; LAVIOLA, B.G.; BHERING, L.L.; MENDONÇA, S.; COSTA, T.S.A.; ANTONIASSI, R. Oil content increase and toxicity reduction in *jatropha* seeds through family selection. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.80, p.70-76, 2016.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.034>

PEREIRA, A.F.C. **Determinação simultânea de acidez, índice de refração e viscosidade em óleos vegetais usando espectrometria NIR, calibração multivariada e seleção de variáveis**. 2007. 75p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007. Disponível em: <

http://www.quimica.ufpb.br/posgrad/dissertacoes/Dissertacao_Alessandra_Felix.pdf >.

Acesso em: 06dez.2015.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, C.S.S.; COELHO, G.L.V.; MENDES, M.F. Avaliação de diferentes tecnologias na extração do óleo de pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.). **Revista de Ciências da Vida**, Seropédica, v.31, n.2, p.57-68, 2011.

PIMENTEL, C. **Metabolismo do carbono na agricultura tropical**. Seropédica: EDUR, 1998. 159p.

POMPELLI, M.F.; BARATA-LUÍS, R.; VITORINO, H.S.; GONÇALVES, E.R.; ROLIM, E.V.; SANTOS, M.G.; ALMEIDA-CORTEZ, J.S.; FERREIRA, V.M.; LEMOS, E.E.P.; ENDRES, L. Photosynthesis, photoprotection and antioxidant activity of purging nut under drought deficit and recovery. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.34, n.8, p.1207-1215, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.03.011>

PONCIANO DE DEUS, F. **Produção de pinhão manso submetido a diferentes laminas de irrigação e níveis de adubação potássica**. 2010. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010. Disponível em: < http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3299/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20pinh%C3%A3o%20manso%20submetido%20a%20diferentes%20laminas%20de%20irriga%C3%A7%C3%A3o%20e%20n%C3%ADveis%20de%20aduba%C3%A7%C3%A3o%20pot%C3%A1ssica.pdf >. Acesso em: 23maio2013.

PORTELA, F.M. **Efeito da catálise ácida e alcalina na produção e propriedades físico-químicas do biodiesel metílico de pinhão-manso**. 2011. 75p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. Disponível em: < <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/3112> >. Acesso em: 08dez.2015.

PURCINO, A.A.; DRUMMOND, O.A. Pinhão-manso. Belo Horizonte: EPAMIG, 1986. 7p.

QUINTELLA, C.M.; TEIXEIRA, L.S.G.; KORN, M.G.A.; NETO, P.R.C.; TORRES, E.A.; CASTRO, M.P.; JESUS, C.A.C. Cadeia do biodiesel da bancada à indústria: uma visão geral com prospecção de tarefas e oportunidades para P&D&I. **Química Nova**, São Paulo, v.32, n.3, p.793-808, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422009000300022>

RABELLO, W.S.; THIEBAUT, J.T.L.; VASCONCELOS JUNIOR, J.F.S. Estudo de dados longitudinais por meio da análise univariada aproximada. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.8, n.1, p.193-201, 2015. <http://dx.doi.org/10.14688/1984-3801/gst.v8n1p193-201>

RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, Potafós, 1991. 343p.

RAJU, A.J.S.; EZRADANAM, V. Pollination ecology and fruiting behavior in a monoecious species, *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae). **Current Science**, Bangalore, v.83, n.11, p.1395-1398, 2002.

RAMANJANEYULU, A.V.; REDDY, A.V.; MADHAVI, A. The impact of sowing date and irrigation regime on castor (*Ricinus communis* L.) seed yield, oil quality characteristics and fatty acid composition during post rainy season in South India. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.44, p.25-31, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.10.008>

RAMOS, L.P.; DOMINGOS, A.K.; KUCEK, K.T.; WILHELM, H.M. Biodiesel: um projeto de sustentabilidade econômica e socioambiental para o Brasil. **Biotecnologia: Ciência e Desenvolvimento**, Brasília, v.31, p.28-37, 2003.

RAMOS, M.J.; FERNÁNDEZ, C.M.; CASAS, A.; RODRÍGUEZ, L.; PÉREZ, A. Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. **Bioresource Technology**, Essex, v.100, n.1, p.261-268, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.039>

RAO, G.R.; KORWAR, G.R.; SHANKER, A.K.; RAMAKRISHMA, Y.S. Genetic associations, variability and diversity in seed characters growth, reproductive phenology and yield in *Jatropha curcas* (L.) accessions. **Trees: structure and function**, Berlin, v.22, n.5, p.697-709, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-008-0229-4>

REDÁ, S.Y.; CARNEIRO, P.I.B. Óleos e gorduras: Aplicações e implicações. **Revista Analytica**, São Paulo, n.27, p.60-67, 2007.

REGITANO-d'ARCE, M.A.B. Deterioração de lipídeos – ranço. In: OETTERER, M; REGITANO-d'ARCE, M.A.B; SPOTTO, M.H.F. (Ed.) **Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos**. Barueri: Manole, 2006. p.243-270.

RIBEIRO, R.A.; QUEIROZ, M.G.M.N.; ALVES, V.L.; PRATA, E.R.B.A.; BARBOSA, S.E.; SANTOS, E.M.; MOTA, B.S.N. Efeitos do tempo de armazenamento sobre as propriedades físico-químicas de óleo de *Jatropha curcas* (pinhão manso). **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v.14, n.1, p.1-7, 2010.

ROCHA, R.B.; RAMALHO, A.R.; TEIXEIRA, A.L.; LAVIOLA, B.G.; SILVA, F.C.G.; MILITÃO, J.S.L.T. Eficiência da seleção para incremento do teor de óleo do pinhão-manso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.1, p.44-50, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000100007>

RODRIGUES, J.; MIRANDA, I.; GOMINHO, J.; VASCONCELOS, M.; BARRADAS, G.; PEREIRA, H.; BIANCHI-DE-AGUIAR, F.; FERREIRA-DIAS, S. Variability in oil content and composition and storage stability of seeds from *Jatropha curcas* L. grown in Mozambique. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.50, p.828-837, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.038>

ROSCOE, R. **O que muda com a liberação do plantio de pinhão-manso no Brasil?** Catálogo da Indústria do Biodiesel. 2008. BiodieselBR Online Ltda. Disponível em: < <http://www.biodieselbr.com/noticias/colunistas/convidado/muda-liberacao-plantio-pinhao-manso-brasil-07-02-08.htm> >. Acesso em: 01/12/2015.

SANTANA, T.A.; OLIVEIRA, P.S.; SILVA, L.D.; LAVIOLA, B.G.; ALMEIDA, A.A.F.; GOMES, F.P. Water use efficiency and consumption in different Brazilian genotypes of *Jatropha curcas* L. subjected to soil water deficit. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.75, p.119-125, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.02.008>

SANTIAGO, L.S.; WRIGHT, S.J.; HARMS, K.E.; YAVITT, J.B.; KORINE, C.; GARCIA, M.N.; TURNER, B.L. Tropical tree seedling growth responses to nitrogen, phosphorus and potassium addition. **Journal of Ecology**, Oxford, v.100, n.2, p.309-316, 2012. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01904.x>

SANTOS, C.M.; ENDRES, L.; WANDERLEY FILHO, H.C.L.; FERREIRA, V.M.; ROLIM, E.V. Fenologia e crescimento do pinhão-manso cultivado na zona da mata do estado de Alagoas, Brasil. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.11, n.3, p.201-209, 2010.

SAPETA, H.; COSTA, J.M.; LOURENÇO, T.; MAROCO, J.; VAN DER LINDE, P.; OLIVEIRA, M. Drought stress response in *Jatropha curcas*: growth and physiology.

Environmental and Experimental Botany, Elmsford, v.85, p.76-84, 2013.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.08.012>

SARIN, A.; ARORA, R.; SINGH, N.P.; SHARMA, M.; MALHOTRA, R.K. Influence of metal contaminants on oxidation stability of *Jatropha* biodiesel. **Energy**, Oxford, v.34, n.9, p.1271-1275, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.05.018>

SAS Institute. 2009. SAS/STAT user's guide. 20. Version 9.2. Cary: SAS Institute Inc., 2009.

SATO, M.; BUENO, O.C.; ESPERANCINI, M.S.T.; FRIGO, E.P. A cultura do pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.): uso para fins combustíveis e descrição agrônômica. **Varia Scientia**, Cascavel, v.7, n.13, p.47-62, 2007.

SATURNINO, H.M.; PACHECO, D.D.; KAKIDA, J.; TOMINAGA, N.; GONÇALVES, N.P. Cultura do pinhão. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.26, n.229, p.44-78, 2005.

SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.; VIGIL, M.; BELOW, F.E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.23, p.2173-2187, 1992.

<http://dx.doi.org/10.1080/00103629209368733>

SCHIAVO, J.A.; SILVA, C.A.; ROSSET, J.S.; SEGRETTI, M.L.; SOUSA, R.A.C., CAPPI, N. Composto orgânico e inoculação micorrízica na produção de mudas de pinhão manso. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.40, n.3, p.322-329, 2010.

SCHULZ, D.G.; FEY, R.; MALAVASI, U.C.; MALAVASI, M.M. Crescimento de pinhão-manso em função da área útil e do consórcio com tifton 85. **Floresta**, Curitiba, v.44, n.2, p.207-216, 2014. <http://dx.doi.org/10.5380/rev.v44i2.32291>

SEVERINO, L. S.; NÓBREGA, M. B. M.; GONÇALVES, N. P.; EGUÍA, M. T. J. **Viagem à Índia para Prospecção de Tecnologias sobre Mamona e Pinhão Manso**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 56p. (Documentos, 153).

SEZEN, S.M.; YAZAR, A.; KAPUR, B.; TEKIN, S. Comparison of drip and sprinkler irrigation strategies on sunflower seed and oil yield and quality under mediterranean conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.98, n.7, p.1153-1161, 2011.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2011.02.005>

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v.52, n.4, p.591-611, 1965. <http://dx.doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>

SIMÕES, W.L.; DRUMOND, M.A.; GUIMARÃES, M.J.M.; OLIVEIRA, A.R.; FERREIRA, P.P.B.; SOUZA, M.A. Desenvolvimento inicial e respostas fisiológicas do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v.12, n.4, p.188-195, 2014.

SILVA, C.L.M. **Obtenção de ésteres etílicos a partir da transesterificação do óleo de andiroba com etanol**. 2005. 64p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Disponível em: < <http://biq.iqm.unicamp.br/arquivos/teses/vtIs000376024.pdf> >. Acesso em: 15 dez. 2015.

SILVA, E.B.; TANURE, L.P.P.; SANTOS, S.R.; RESENDE JUNIOR, P.S. Sintomas visuais de deficiências nutricionais em pinhão-manso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.4, p.392-397, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000400009>

SILVA, M.B.R.; FERNANDES, P.D.; DANTAS NETO, J.; NERY, A.R.; RODRIGUES, L.N.; VIÉGAS, R.A. Crescimento e produção do pinhão-manso irrigado com água residuária sob condições de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.6, p.621-629, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000600013>

SILVA, N.E.; RIBEIRO, R.V.; FERREIRA-SILVA, S.L.; VIÉGAS, R.A.; SILVEIRA, J.A.G. Comparative effects of salinity and water stress on photosynthesis, water relations and growth of *Jatropha curcas* plants. **Journal of Arid Environments**, London, v.74, n.10, p.1130-1137, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.05.036>

SINGH, K.; SINGH, B.; TULI, R. Sodic soil reclamation potential of *Jatropha curcas*: A long-term study. **Ecological Engineering**, Oxford, v.58, p.434-440, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.006>

SINGH, K.; SINGH, B.; VERMA, S.K.; PATRA, D.D. *Jatropha curcas*: A ten year story from hope to despair. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v.35, p.356-360. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.033>

SINGH, Y.P.; NAYAK, A.K.; SHARMA, D.K.; SINGH, G.; MISHRA, V.K.; SINGH, D. Evaluation of *Jatropha curcas* genotypes for rehabilitation of degraded sodic lands. **Land Degradation & Development**, Chichester, v.26, n.5, p.510-520, 2015. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2398>

SINHA, P.; ISLAM, M.A.; NEGI, M.S.; TRIPATHI, S.B. Changes in oil content and fatty acid composition in *Jatropha curcas* during seed development. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.77, p.508-510, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.025>

SLUSZZ, T.; MACHADO, J.A.D. Culturas matérias-primas para biodiesel e o potencial de adoção pela agricultura familiar nas diferentes regiões brasileiras. In: PICHLER, N.A.; PADILHA, A.C.M.; ROCHA, J.M. (Org.). **Biodiesel**. Jaguarão/RS: UNIPAMPA, 2011, p.161-182.

SOP, T.K.; KAGAMBEGA, F.W.; BELLEFONTAINE, R.; SCHMIEDEL, U.; THIOMBIANO, A. Effects of organic amendment on early growth performance of *Jatropha curcas* L. on a severely degraded site in the Sub-Sahel of Burkina Faso. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v.86, n.6, p.387-399, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-011-9421-4>

SOUSA, A.E.C.; GHEYI, H.R.; CORREIA, K.G.; SOARES, F.A.L.; NOBRE, R.G. Crescimento e consumo hídrico de pinhão manso sob estresse salino e doses de fósforo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.42, n.2, p.310-318, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902011000200008>

SOUSA, A.E.C.; GHEYI, H.R.; SOARES, F.A.L.; NASCIMENTO, E.C.S.; ANDRADE, L.O. Biometria e desenvolvimento de pinhão-manso irrigado com diferentes lâminas de água residual e adubação fosfatada. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.25, n.2, p.119-127, 2012.

SOUSA, J.A.D.; GUERRA, H.O.C. Irrigation, organic fertilizer and soil mulching in *Jatropha curcas* L. initial growth. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.25, n.1, p.104-112, 2012.

SOUSA, V.F.; COELHO, E.F.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; FOLEGATTI, M.V.; FRIZZONE, J. A. Eficiência do uso da água pelo meloeiro sob diferentes frequências de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.2, p.183-188, 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662000000200009>

SOUZA, C.M.; SILVA, J.A.A.; FERREIRA, R.L.C.; SANTOS, E.S.; MEUNIER, I.M.J.; FERRAZ, I. Avaliação do crescimento em altura de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit., no Agreste de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.3, n.3, p.260-266, 2008. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v3i3a281>

SPINELLI, V.M.; ROCHA, R.B.; RAMALHO, A.R.; MARCOLAN, A.L.; VIEIRA, J.R.; FERNANDES, C.F.; MILITÃO, J.S.T.; DIAS, L.A.S. Componentes primários e secundários do rendimento de óleo de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, p.1752-1758, 2010.

SUJATHA, M.; DHINGRA, M. Rapid plant regeneration from various explants of *Jatropha integerrima*. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, Dordrecht, v.35, n.3, p.293-296, 1993. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00037284>

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

TAPANES, N.C.O.; ARANDA, D.A.G.; CARNEIRO, J.W.M.; ANTUNES, O.C.A. Transesterification of *Jatropha curcas* oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiesel reaction. **Fuel**, London, v.87, p.2286-2295, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2007.12.006>

TEWARI, D.N. **Jatropha & bio-diesel**. New Delhi: Ocean Books, 2009. 228p.

TIKKOO, A.; YADAV, S.S.; KAUSHIK, N. Effect of irrigation, nitrogen and potassium on seed yield and oil content of *Jatropha curcas* in coarse textured soils of northwest India. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.134, p.142-146, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2013.08.001>

TJEUW, J.; SLINGERLAND, M.; GILLER, K. Relationships among *Jatropha curcas* seed yield and vegetative plant components under different management and cropping systems in Indonesia. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.80, p.128-139, 2015.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.003>

TORRES, C.M.M.E.; JACOVINE, L.A.G.; TOLEDO, D.P.; SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, S.C.; MARTINS, M.C. Biomass and carbon stock in *Jatropha curcas* L. **Cerne**, Lavras, v.17, n.3, p.353-359, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602011000300009>

UCCC – University of California Committee of Consultants. **Guidelines for interpretation of water quality for agriculture**. Davis: University of California, 1974. 13p.

VALDES-RODRIGUEZ, O.A.; SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, O.; PÉREZ-VÁZQUEZ, A.; RUIZ-BELLO, R. Soil texture effects on the development of *Jatropha* seedlings—Mexican variety “piñón manso”. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.35, n.8, p.3529-3536, 2011.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.003>

VALE, D.W. **Efeito da aplicação de nitrogênio nos atributos químicos do solo, na nutrição e na produção de cana-de-açúcar**. 2009. 120 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal)) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2009. Disponível em: <

<http://www.fcav.unesp.br/download/pgtrabs/pv/m/3801.pdf> >. Acesso em: 07jul.2015.

VIEIRA, D.A.P.; PORTES, T.A.; STACCIARINI-SERAPHIN, E.; TEIXEIRA, J.B. Fluorescência e teores de clorofilas em abacaxizeiro cv. Pérola submetido a diferentes concentrações de sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.32, n.2, p.360-368, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452010005000061>

VISENTAINER, J.V.; FRANCO, M.R.B. **Ácidos Graxos em Óleos e Gorduras: Identificação e Quantificação**. São Paulo: Varela, 2006. v.1. 124p.

VISENTAINER, J.V.; SANTOS JUNIOR, O.O. Aspectos reacionais e da química analítica na produção e controle de qualidade do biodiesel de óleos e gorduras. Maringá: EDUEM, 2013. v.1. 94p.

WANI, S.P.; CHANDER, G.; SAHRAWAT, K.L.; RAO, CH.S.; RAGHVENDRA, G.; SUSANNA, P.; PAVANI, M. Carbon sequestration and land rehabilitation through *Jatropha curcas* (L.) plantation in degraded lands. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.161, p.112-120, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.07.028>

WANG, L.B.; YU, H.Y.; HE, X.H.; LIU, R.Y. Influence of fatty acid composition of woody biodiesel plants on the fuel properties. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, Amsterdam, v.40, n.4, p.397-404, 2012. [http://dx.doi.org/10.1016/S1872-5813\(12\)60018-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1872-5813(12)60018-8)

WEN, Y.; TANG, M.; SUN, D.; ZHU, H.; WEI, J.; CHEN, F.; TANG, L. Influence of Climatic Factors and Soil Types on Seed Weight and Oil Content of *Jatropha Curcas* in Guangxi, China. **Procedia Environmental Sciences**, Amsterdam, v.12, p.439-444, 2012a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.301>

WEN, Y.; ZHU, H.; TANG, M.; CHEN, F.; TANG, L.; XU, Y. The distribution and resource evaluation of typical energy plants (*Jatropha curcas* L.) in Guangxi, China. **Advanced Materials Research**, Pfaffikon, v.433-440, p.1333-1337, 2012b. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.1333>

WUST, E. **Estudo da viabilidade técnico-científica da produção de biodiesel a partir de resíduos gordurosos**. 2004. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2004.

YANG, Q.; LI, F.; ZHANG, F.; LIU, X. Interactive effects of irrigation frequency and nitrogen addition on growth and water use of *Jatropha curcas*. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.59, p.234-242, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.023>

YE, M.; CAIYAN, L.; FRANCIS, G; MAKKAR, H.P.S. Current situation and prospects of *Jatropha curcas* as a multipurpose tree in China. **Agroforest System**, Dordrecht, v.76, n.2, p.487-497, 2009. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-009-9226-x>

YONG, J.W.H.; NG, Y.F.; TAN, S.N.; CHEW, A.Y.L. Effect of fertilizer application on photosynthesis and oil yield of *Jatropha curcas* L. **Photosynthetica**, Prague, v.48, n.2, p.208-218, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s11099-010-0026-3>