



## Genetic variability and genetic progress in seed traits in breeding the physic nut

### *Variabilidade genética e progresso genético em caracteres de sementes no melhoramento de pinhão-mansão*

Liliana Rocivalda Gomes Leitão<sup>1\*</sup>, Linda Brenna Ribeiro Araújo<sup>1</sup>, Rosilene Oliveira Mesquita<sup>2</sup>, Cândida Hermínia Campos de Magalhães Bertini<sup>2</sup>

**Abstract:** Determining the chemical composition of seeds of the physic nut (*Jatropha curcas* L.) is of great importance for the species due to the oil content of the seeds (the principal trait of interest). Identifying promising genotypes with selectable seed traits is one of the strategies adopted in breeding the physic nut in order to increase the yield and quality of the oil. Therefore, the aim of this study was to determine the chemical composition of seed traits in ten half-sibling progeny of the physic nut, and to identify which progeny have good genetic performance for transmission to the offspring. The experimental design was completely randomised, with ten treatments and four replications. The treatments were represented by seeds from half-sibling progeny in which the carbohydrate, protein and lipid content, and the composition of the fatty acids were evaluated. The genetic parameters and the gains from their selection were predicted for the principal seed traits using mixed-model analysis, including REML (restricted maximum likelihood) and BLUP (best linear unbiased prediction). The physic-nut seeds showed an average dry matter (DM) concentration of 60 mg g<sup>-1</sup> carbohydrates, 42 mg g<sup>-1</sup> protein and 142 mg g<sup>-1</sup> total lipids. Unsaturated fatty acids represented more than 85% of the total fatty acid composition, with the oil classified as oleic-linoleic. Considering the predictions of the genetic parameters, the lipid traits can be selected for the purpose of breeding, resulting in genetic progress in the yield and quality of physic-nut oil.

**Key words:** Fatty acids. Genetic components. Selection gain. *Jatropha curcas* L. Mixed models.

**Resumo:** A determinação da composição química em sementes de pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) possui grande importância para a espécie devido à presença do teor de óleo (principal caráter de interesse) nessas sementes. A identificação de genótipos promissores, com caracteres de sementes passíveis de seleção, é uma das estratégias adotadas no melhoramento de pinhão-mansão visando aumentar a produção e a qualidade do óleo. Assim, objetivou-se com este estudo determinar a composição química em caracteres de sementes em dez progênies de meios-irmãos de pinhão-mansão e identificar quais progênies possuem boa performance genética para serem transmitidas à descendência. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com dez tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram representados por sementes de progênies de meios-irmãos, das quais foram avaliados os teores de carboidratos, proteínas, lipídios e a composição dos ácidos graxos. Os parâmetros genéticos e ganhos com a seleção foram preditos para os principais caracteres das sementes utilizando análises de modelos mistos, via REML (máxima verossimilhança restrita) e BLUP (melhor predição linear não viciada). As sementes de pinhão-mansão apresentaram concentrações médias de 60 mg g<sup>-1</sup> de massa de matéria seca (MS) de carboidratos, 42 mg g<sup>-1</sup> MS de proteínas e 142 mg g<sup>-1</sup> MS de lipídios totais. Os ácidos graxos insaturados representaram mais de 85% da composição total dos ácidos graxos, e o óleo foi classificado como oleico-linoleico. Considerando as predições dos parâmetros genéticos, os caracteres lipídicos são passíveis de seleção para fins de melhoramento, resultando em progressos genéticos para produção e qualidade de óleo de pinhão-mansão.

**Palavras-chave:** Ácidos graxos. Componentes genéticos. Ganho de seleção. *Jatropha curcas* L. Modelos mistos.

\*Corresponding author

Submitted for publication on 10/01/2021, approved on 17/03/2021 and published on 07/05/2021

<sup>1</sup>Engenheira Agrônoma. Mestra em Agronomia/Fitotecnia, Universidade Federal do Ceará, UFC, Campus do Pici, Fortaleza – CE, Brasil. E-mails: [liliaceae@hotmail.com.br](mailto:liliaceae@hotmail.com.br); [lindabrenna@gmail.com](mailto:lindabrenna@gmail.com)

<sup>2</sup>Professora de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, UFC, Campus do Pici, Fortaleza – CE, Brasil. E-mails: [rosilenemesquita@gmail.com](mailto:rosilenemesquita@gmail.com); [candida@ufc.br](mailto:candida@ufc.br)

## INTRODUCTION

Vegetable oils, which make up the raw material for biofuels, are a potential alternative to fossil fuels, offering savings on energy and production costs (ORTIZ *et al.*, 2020). In a changing world, the search for sustainable sources that meet the energy demand and have less impact on the environment drives the research to obtain fuels derived from oilseed crops (WAHYUDI *et al.*, 2018; ORTIZ *et al.*, 2020).

The physical and chemical properties of biofuels are similar to those of diesel made from petroleum, and can be used in pure or in mixed form without altering the operation of the diesel engine (ANDRADE *et al.*, 2017). Biodiesel is among the principal biofuels used in the world, and Brazil has the capacity for its production using various oil species, such as the physic nut (*Jatropha curcas* L.) (SOUZA *et al.*, 2018).

The physic nut, a species of family Euphorbiaceae, is used in the production of bioenergy due to the high quality of its oil, which contains high levels of fatty acids and is of low viscosity (ALBURQUERQUE *et al.*, 2017). In addition, it adapts easily and displays good agronomic performance under differing agroclimatic conditions (BORAH *et al.*, 2018), including semi-arid regions. Furthermore, it does not compete with species that produce traditional edible and nutritional oils (WASSNER *et al.*, 2016).

The chemical composition of the seeds is of great importance as they act as a reserve, providing energy and nutrients for development of the embryo and, later, of the seedling itself (MARTINS *et al.*, 2007). These nutrients are important traits of oilseeds, and can be used in selection with the aim of increasing the lipid content, as demonstrated by Singh *et al.* (2016).

The concentration of oil and fatty acids was also determined by Jonas *et al.* (2020) when evaluating maturity in the fruit and seed of the physic nut. The authors found that the lipid content varied from 38.7% to 45.8%, while that of unsaturated fatty acids made up more than 70% of the total, with a predominance of linoleic and oleic acids present in seeds collected from fruit at four phenological stages.

In addition to determining the chemical composition, predicting genetic gains by the selection of superior genotypes is another important step in improving the species. These genetic gains can be estimated using mixed models, including REML (restricted maximum likelihood) and BLUP (best linear unbiased prediction), to predict genetic parameters and progress (RESENDE, 2016), helping to identify genotypes with good genetic performance.

## INTRODUÇÃO

Os óleos vegetais, constituintes da matéria-prima dos biocombustíveis, são potenciais fontes alternativas de combustíveis fósseis, economizando energia e custos de produção (ORTIZ *et al.*, 2020). Em um mundo de mudanças, a busca por fontes sustentáveis, que atendam a demanda energética e causem menores impactos ambientais, impulsiona as pesquisas para obtenção de combustíveis derivados de culturas oleaginosas (WAHYUDI *et al.*, 2018; ORTIZ *et al.*, 2020).

Os biocombustíveis possuem propriedades físico-químicas semelhantes ao diesel oriundo do petróleo e podem ser usados de forma pura ou misturada sem alterar o funcionamento dos motores a diesel (ANDRADE *et al.*, 2017). O biodiesel está entre os principais biocombustíveis utilizados no mundo, e o Brasil possui capacidade de produzi-los a partir de diferentes espécies oleaginosas, como o pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) (SOUZA *et al.*, 2018).

O pinhão-mansão, espécie da família Euphorbiaceae, é usado na produção de bioenergia por apresentar alta qualidade de óleo, contendo elevados teores de ácidos graxos e baixa viscosidade (ALBURQUERQUE *et al.*, 2017). Ademais, apresenta bom desempenho adaptativo e agrônomico em diferentes condições agroclimáticas (BORAH *et al.*, 2018), incluindo áreas de semiáridas, além de não competir com as espécies produtoras de óleos comestíveis e alimentícios tradicionais (WASSNER *et al.*, 2016).

A composição química das sementes tem grande importância por serem fontes de reserva que fornecem energia e nutrientes ao desenvolvimento do embrião e, posteriormente, da própria plântula (MARTINS *et al.*, 2007). Esses nutrientes constituem importantes caracteres das sementes oleaginosas e podem ser utilizados para fins de seleção, visando aumentar os teores de lipídicos, como demonstrado por Singh *et al.* (2016).

Concentrações de óleo e ácidos graxos também foram determinadas por Jonas *et al.* (2020) na avaliação da maturidade dos frutos e das sementes de pinhão-mansão. Os autores constataram que o conteúdo de lipídios variou de 38,7 a 45,8%; e o dos ácidos graxos insaturados compuseram mais de 70% da variação total, havendo predomínio dos ácidos linoleico e oleico presentes em sementes coletadas de frutos em quatro estádios fenológicos.

Além da determinação da composição química, a predição dos ganhos genéticos com a seleção de genótipos superiores constitui outra etapa importante do melhoramento dessa espécie. Esses ganhos genéticos podem ser estimados usando modelos mistos, via REML (máxima verossimilhança restrita) e BLUP (melhor predição linear não viciada), na predição de parâmetros genéticos e progressos genéticos (RESENDE, 2016), auxiliando na identificação de genótipos com boa performance genética.

Genetic parameters are important tools in plant breeding, as they suggest the strategies to be adopted based on the prediction of a given trait (CRUZ *et al.*, 2012). In the physic nut, it is essential to predict the genetic parameters of seed traits since they comprise the area of interest of the species, and are influenced by genetic and environmental factors.

Genetic progress in the traits of seeds of the physic-nut is rare (SINGH *et al.*, 2016), as there is a tendency to predict any gains from selection using morphological traits and grain yield (BORGES *et al.*, 2014; PEIXOTO *et al.*, 2017). However, Singh *et al.* (2016) estimated genetic progress in lipid traits and found a genetic advance of 16.15% in the oil content, and 4.27% and 9.37% in oleic and linoleic acids respectively (SINGH *et al.*, 2016). The aim of this study, therefore, was to determine the chemical composition of seed traits in ten half-sibling progeny of the physic nut, and to identify which progeny have good genetic performance for transmission to the offspring.

## MATERIAL AND METHODS

The experiment was carried out at the Laboratory of Cell Biology and the Laboratory of Plant Protein Biology and Biochemistry, at the Science Centre of the Federal University of Ceará (UFC), in Fortaleza, Brazil, from 2014 to 2015.

The trial was conducted in Pentecoste in the state of Ceará (CE), at the Vale do Curu Experimental Farm of UFC, located at 3°47' S and 39°16' W, at an altitude of 45 m. According to the Köppen-Geiger classification, the climate in the experimental area is tropical rainy (Aw'), with a dry season of from five to eight months, an average annual temperature of 29°C, relative humidity of 59% and rainfall of 756 mm.

Seeds from each half-sibling progeny of the physic nut were sown at a depth of 3.0 cm in individual polyethylene bags (1 kg) filled with a mixture of two parts commercial substrate to one part coconut fibre in a greenhouse located on the Pici Campus of UFC. Three months after planting, the seedlings were transplanted to the field at the Experimental Farm at a spacing of 2 x 3 m. The progeny were grown in a randomised block design, with three replications and two plants per plot.

Os parâmetros genéticos são ferramentas importantes no melhoramento de plantas, pois direcionam estratégias a serem adotadas a partir da predição de determinados caracteres (CRUZ *et al.*, 2012). Para o pinhão-manso é fundamental prever os parâmetros genéticos de caracteres de sementes, uma vez que compõem o interesse da espécie e são influenciados por fatores genéticos e ambientais.

Progresso genético em caracteres de sementes de pinhão-manso são escassos (SINGH *et al.*, 2016), pois há uma tendência em prever ganhos com a seleção em caracteres morfológicos e rendimento de grãos (BORGES *et al.*, 2014; PEIXOTO *et al.*, 2017). Entretanto, Singh *et al.* (2016) estimaram o progresso genético em caracteres lipídicos, obteve avanço genético de 16,15% para teor de óleo e 4,27 e 9,37%, para os ácidos oleico e linoleico, respectivamente (SINGH *et al.*, 2016). Portanto, objetivou-se determinar a composição química em caracteres de sementes em dez progênies de meios-irmãos de pinhão-manso e identificar quais progênies possuem boa performance genética para serem transmitidas à descendência.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado nos Laboratórios de Biologia Celular e de Bioquímica e Biologia de Proteínas Vegetais, localizados nos Departamentos de Biologia e Bioquímica Molecular, respectivamente, do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará (UFC), em Fortaleza, no período de 2014-2015.

O ensaio foi conduzido em Pentecoste (CE), na Fazenda Experimental Vale do Curu-UFC, localizada na latitude de 3°47'S, longitude de 39°16' W e a 45 m de altitude. O clima da área experimental foi classificado como tropical chuvoso (Aw'), segundo Köppen-Geiger, com estação seca de cinco a oito meses, temperatura média anual de 29 °C, umidade relativa de 59% e precipitação de 756 mm.

As sementes de cada progênie de meios-irmãos de pinhão-manso foram semeadas em sacos de polietileno (1 kg) preenchidos pela mistura de substrato comercial e de fibra de coco na proporção de 2:1. As sementes foram semeadas, individualmente, a 3,0 cm de profundidade do substrato, e condução em casa de vegetação situada no Campus do Pici (UFC). Aos três meses após o plantio, as mudas foram transplantadas para o campo da Fazenda Experimental, adotando-se o espaçamento de 2 x 3 m. As progênies foram conduzidas sob delineamento experimental de blocos casualizados, com três repetições e duas plantas por parcela.

Base fertiliser was applied when planting, based on the soil analysis and, due to the lack of recommendations for the physic nut, on the fertiliser recommendations for the castor bean in the state of Ceará (AQUINO *et al.*, 1993). Irrigation was by micro-sprinkler, three times a week or according to the water availability. Manual weeding to control the weeds, and phytosanitary practices for pest control were carried out when necessary.

Twelve months after planting the physic nut, the fruit was harvested from open-pollinated plants, always following the same pattern: the fruit was completely ripe, and characterised as dry, dark brown and dehiscent; the fruit was shelled, and the seeds collected and stored in a cold chamber at 9°C and relative humidity of 45% for 12 months before the level of carbohydrates, proteins and lipids was determined.

The chemical composition of the physic nut was determined in a completely randomised design of ten treatments, with four replications and an experimental unit of 125 seeds. The seeds were selected at random after the removal of any badly formed seeds. Each treatment was represented by one half-sibling progeny of the physic nut, and had the following identification and origin: JCCE034 (Crateús, CE), JCCE037 (Crateús, CE), JCCE038 (Crateús, CE), JCCE053 (Parambu, CE), JCCE055 (Parambu, CE), JCCE064 (Parambu, CE), JCCE069 (Pius IX, PI), JCCE099 (UFRRJ, RJ), JCCE103 (UFRRJ, RJ) and JCCE108 (UFRRJ, RJ).

These progeny come from the physic-nut germplasm of UFC, collected in rural communities (during collecting expeditions), and from accessions from the germplasm of UFRRJ. The selection criterion for choosing the progeny was their promising results during the initial stages of the morpho-agronomic evaluation carried out by the research group.

Before determining the chemical composition of the physic-nut seeds, they were separated into tegument and kernel, and an analysis was then made of the kernels. The carbohydrate content was determined by the anthrone method (YEMM; WILLIS, 1954) in a set of sulphuric acid ( $H_2SO_4$ ) hydrolysis and dehydration reactions on the sugars. The reading was taken by mass spectrophotometry using the standard glucose curve and an absorbance wavelength of 620 nm (nanometres). The result was expressed in  $mg\ g^{-1}$  dry matter weight (DM).

No plantio foi realizada uma adubação de fundação com base na análise do solo e nas recomendações para adubação de mamona para o estado do Ceará (AQUINO *et al.*, 1993), diante da escassez de informações sobre a recomendação de adubação do pinhão-manso para o estado. A irrigação foi realizada por microaspersão, durante três vezes por semana, ou de acordo com a disponibilidade de água. Capinas manuais foram realizadas, quando necessário, para o controle de plantas daninhas e práticas fitossanitárias para o controle de pragas.

Aos 12 meses após o plantio, os frutos de pinhão-manso foram colhidos, em plantas de polinização aberta, seguindo o mesmo padrão. Os frutos estavam completamente maduros, caracterizados por estarem secos, marrons escuros e deiscentes. Esses frutos foram descascados e as sementes foram coletadas e armazenadas em câmara fria a 9 °C e umidade relativa de 45% durante 12 meses até a determinação dos teores de carboidratos, proteínas e lipídios.

O ensaio de composição química das sementes de pinhão-manso foi conduzido sob delineamento inteiramente casualizado com dez tratamentos, quatro repetições e unidade experimental de 125 sementes. A seleção das sementes foi feita de forma aleatória, após a eliminação de sementes malformadas. Cada tratamento foi representado por uma progênie de meios-irmãos de pinhão-manso, com as seguintes nomenclaturas e procedências: JCCE034 (Crateús - CE); JCCE037 (Crateús - CE); JCCE038 (Crateús - CE); JCCE053 (Parambu - CE); JCCE055 (Parambu - CE); JCCE064 (Parambu - CE); JCCE069 (Pio IX - PI); JCCE099 (UFRRJ - RJ); JCCE103 (UFRRJ - RJ); e, JCCE108 (UFRRJ - RJ).

Essas progênies são oriundas do germoplasma de pinhão manso da UFC e coletadas em comunidades rurais (durante expedições de coleta) e de acessos do germoplasma da UFRRJ. As progênies foram selecionadas, por apresentarem resultados promissores nas etapas iniciais de avaliações morfoagronômicas realizadas pelo grupo de pesquisa.

Antes de realizar a determinação da composição química das sementes de pinhão-manso, as sementes foram separadas em tegumento e amêndoas, e as análises foram feitas nas amêndoas. Os teores de carboidrato foram determinados pelo Método da antrona (YEMM; WILLIS, 1954) em um conjunto de reações hidrolíticas e desidratantes do ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) sobre os açúcares. A leitura foi realizada em espectrofotometria de massa, usando a curva padrão de glicose e um comprimento de onda de 620 nm (nanômetros) de absorbância. O resultado foi expresso em  $mg\ g^{-1}$  de massa de matéria seca (MS).

The protein content was obtained using the method described by Bradford (1976), in a set of sodium hydroxide (NaOH) reactions on proteins stained with CBB (Coomassie Brilliant Blue). The reading was taken by mass spectrophotometry, using bovine serum albumin (BSA) as standard and an absorbance wavelength of 595 nm. The result was expressed in  $\text{mg g}^{-1}$  (DM).

The total lipids were determined by gravimetry, in which 250 mg of kernels were macerated for cold extraction, using absolute hexane as the organic solvent (BLIGH; DYER, 1959). The total lipid content was collected in fat-extraction cups, and quantified as the difference between the weight of the empty extraction cups and the weight of the cups containing the lipids after collection. The results were expressed in  $\text{mg g}^{-1}$  DM.

The fatty acids were extracted from the total lipids by saponification and esterification, as per the methodology adapted from Maia and Rodriguez-Amaya (1993). The fatty acids were separated in a gas chromatograph coupled to a mass-selective detector (Shimadzu GC/MS-QP2010 plus), and quantified using a GC/MS system (Gas Chromatography/Mass Spectrometry). The fatty acids were classified as saturated or unsaturated, and the result was expressed in  $\text{mg g}^{-1}$  DM.

The dates were subjected to tests of normality (Shapiro-Wilk) and homogeneity of variance (Bartlett), and then to analysis of variance by F-test. The mean values were compared by Tukey's test at a level of 5%. The genetic components were predicted by mixed models, using REML/BLUP, considering the statistical model (Equation 1):

$$"y = Xu + Za + e" \quad (1)$$

Where:  $y$  is a vector of phenotypic data;  $u$  is the overall mean value of the test (fixed effect);  $a$  is the vector of the individual additive genetic effects (random effect);  $e$  is the error vector (random effect).  $X$  and  $Z$  represent the incidence matrices for the above effects.

## RESULTS AND DISCUSSION

The chemical composition of the seeds of the ten half-sibling progeny of the physic is presented in Figures 1a and 1b. The carbohydrates had a mean content of  $60.06 \text{ mg g}^{-1}$  DM, with a mean standard error of  $10.31 \text{ mg g}^{-1}$  DM. Proteins showed the lowest concentration, around  $42.5 \text{ mg g}^{-1}$  DM, with a mean standard error of  $12.48 \text{ mg g}^{-1}$  DM. The greatest values were seen for total lipids, with a mean of  $142.36 \text{ mg g}^{-1}$  DM and a mean standard error of  $14.57 \text{ mg g}^{-1}$  DM.

Os teores de proteínas foram obtidos pelo Método descrito por Bradford (1976), em um conjunto de reações do hidróxido de sódio (NaOH) sobre as proteínas coradas com CBB (*Coomassie Brilliant Blue*). A leitura foi realizada em espectrofotometria de massa, utilizando a albumina de soro bovino (BSA) como padrão e um comprimento de onda de 595 nm de absorvância. O resultado foi expresso em  $\text{mg g}^{-1}$  (MS).

Os lipídios totais foram determinados por gravimetria, em que 250 mg de amêndoas foram maceradas para extração a frio, utilizando o hexano absoluto como solvente orgânico (BLIGH; DYER, 1959). Os teores de lipídeos totais foram coletados em copos extratores de gorduras e quantificados por diferenças entre as massas desses copos extratores vazios e massas desses copos extratores contendo os lipídios, após a coleta. Os resultados foram expressos em  $\text{mg g}^{-1}$  MS.

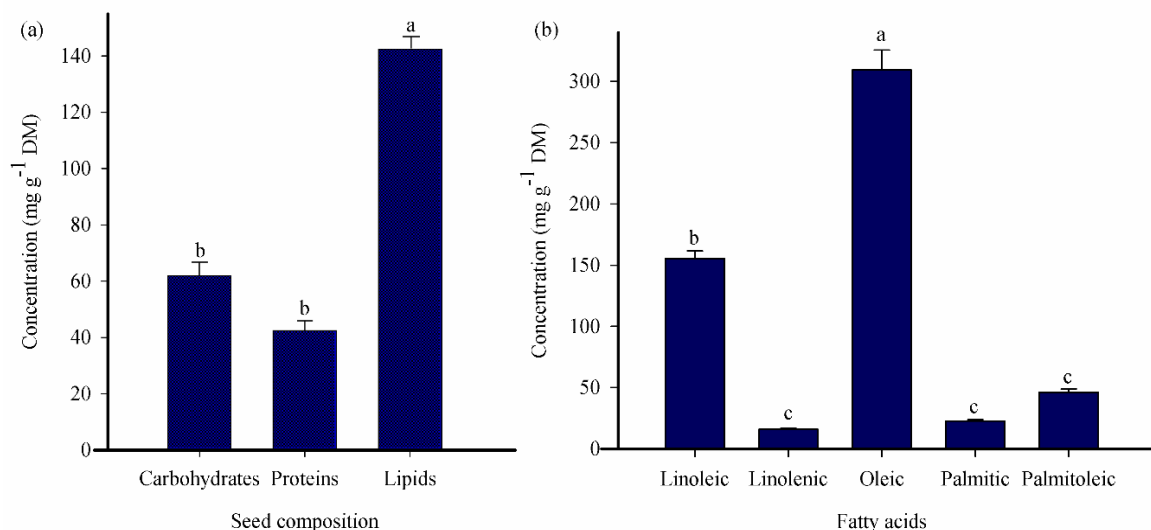
Os ácidos graxos foram extraídos dos lipídios totais pelas etapas de saponificação e esterificação conforme metodologia adaptada de Maia e Rodriguez-Amaya (1993). Os ácidos graxos foram separados em cromatógrafo gasoso acoplado a um detector seletivo de massas (Shimadzu, modelo GC/MS-QP2010 plus) e quantificados pelo sistema GC/MS (*Gas Chromatography/Mass Spectrometry*). Os ácidos graxos foram classificados em saturados e insaturados, e o resultado foi expresso em  $\text{mg g}^{-1}$  MS.

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variância (Bartlett) e, em seguida, foram submetidos à análise de variância pelo teste F. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5%. Os componentes genéticos foram preditos por modelos mistos, via REML/BLUP, considerando o modelo estatístico (Equação 1):

Em que:  $y$  é vetor de dados fenotípicos;  $u$  é a média geral do ensaio (efeito fixo);  $a$  é o vetor dos efeitos genéticos aditivos individuais (efeito aleatório);  $e$  é o vetor de erros (efeito aleatório). As letras X e Z representaram as matrizes de incidência para os referidos efeitos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química das sementes das dez progênies de meios-irmãos de pinhão-manso é apresentada nas Figuras 1a e 1b. Os carboidratos apresentaram teores médio de  $60,06 \text{ mg g}^{-1}$  MS, com erro padrão médio de  $10,31 \text{ mg g}^{-1}$  MS. As proteínas foram os constituintes com menores concentrações, em torno de  $42,5 \text{ mg g}^{-1}$  MS e erro padrão médio de  $12,48 \text{ mg g}^{-1}$  MS; e os lipídios totais estiveram em maiores quantidades, com média de  $142,36 \text{ mg g}^{-1}$  MS e erro padrão médio de  $14,57 \text{ mg g}^{-1}$  MS.



**Figure 1** - Mean concentration and mean standard error for carbohydrates, proteins and lipids (a), and fatty acids (b), in dry matter of seeds of ten half-sibling progeny of the physic nut (*Jatropha curcas*).

\*lowercase letters do not differ by Tukey's test at 5% probability.

**Figura 1** - Concentrações médias e erro padrão médio de carboidratos, proteínas e lipídios (a) e de ácidos graxos (b) na matéria seca de sementes de dez progênies de meios-irmão de pinhão-mansão (*Jatropha curcas*).

\*letras minúsculas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

The unsaturated fatty acids extracted from the total lipids represented more than 85% of the total, with higher concentrations of oleic acid ( $310.48 \pm 16.425 \text{ mg g}^{-1} \text{ DM}$ ) and linoleic acid ( $155.39 \pm 6.24 \text{ mg g}^{-1} \text{ DM}$ ). Linolenic acid, palmitic acid and palmitoleic acid showed lower concentrations, and did not differ statistically (Figure 1b).

Saturated fatty acids, such as capric, stearic, lauric and myristic acid, were also identified in the seeds, however, due to their low concentrations, they were not considered in the analysis. Based on the results, the seeds of the ten half-sibling progeny of the physic nut under evaluation showed reserve accumulations composed of different fatty acids, with the oil classified as oleic-linoleic.

It is of great importance for the species to determine the chemical composition of the physic-nut seed, since the trait of interest, the oil, is found in these reserve organs. Lipid concentrations were also determined in physic-nut genotypes from India (KUMAR; DAS, 2018). The oil content of the accessions varied from 13.7% to 54.4%, with unsaturated fatty acids predominating in the seeds, classifying the oil as linoleic-oleic (KUMAR; DAS, 2018).

Nos ácidos graxos, extraídos dos lipídios totais, os insaturados representaram mais de 85% da variação total, com maiores concentrações para os ácidos oleico ( $310,48 \pm 16,425 \text{ mg g}^{-1} \text{ MS}$ ) e linoleico ( $155,39 \pm 6,24 \text{ mg g}^{-1} \text{ MS}$ ). Os ácidos linolênico, palmítico e palmitoleico estiveram em menores concentrações e não diferiram entre si, estatisticamente (Figura 1b).

Nas sementes também foram identificados ácidos graxos saturados, como cáprico, esteárico, láurico e mirístico. No entanto, por apresentarem baixas concentrações não foram considerados nas análises. Com base nos resultados obtidos, as sementes das dez progênies de meios-irmãos de pinhão-mansão avaliadas apresentaram acúmulos de reservas compostos por diferentes ácidos graxos, sendo o óleo classificado como oleico-linoleico.

A composição química das sementes de pinhão-mansão possui grande importância para a espécie, pois o caráter de interesse, o óleo, se encontra nesses órgãos de reserva. Concentrações lipídicas também foram determinadas em genótipos de pinhão-mansão oriundo da Índia (KUMAR; DAS, 2018). O teor de óleo dos acessos variou de 13,7 a 54,4%, e os ácidos graxos insaturados predominaram nas sementes, classificando o óleo de pinhão-mansão como linoleico-oleico (KUMAR; DAS, 2018).

In African accessions that originated in Ethiopia, the lipid content was greater than 38%, with a predominance of linoleic (>37%) and oleic (>36%) fatty acids in seeds collected from the dried fruit (JONAS *et al.*, 2020). The seeds of the half-sibling progeny evaluated in that study also showed a high concentration of oil (greater than 140 mg g<sup>-1</sup> DM), which was classified as oleic-linoleic, similar to the studies carried out with the Indian and African accessions.

Due to the oxidative stability and physico-chemical properties of fatty acids, the above lipid composition has an effect on the biodiesel production chain, where the use of seeds with higher levels of linoleic acid is desirable (JAIN; SHARMA, 2011).

The data obtained from the chemical composition of the seeds (carbohydrates, proteins and lipids) and the principal fatty acids (oleic and linoleic) were used in the mixed-model analysis. In the REML estimation, additive variance was the major contributor to the phenotypic variance of the lipid traits, demonstrating the inheritable part of genotypic variance (Table 1). For these traits, environmental variance had little influence on the phenotypic manifestation. Phenotypic variance in the carbohydrates and proteins was influenced by the environmental variance, which corresponds to the non-inheritable part of phenotypic variance (Table 1).

Em acessos africanos, originários da Etiópia, o conteúdo de lipídios foi superior a 38%, havendo predomínio dos ácidos graxos linoleico (> 37%) e oleico (> 36%) em sementes coletadas de frutos secos (JONAS *et al.*, 2020). As sementes das progênies de meios-irmãos avaliadas nesse trabalho também apresentaram boas concentrações de óleo (acima de 140 mg g<sup>-1</sup> MS), classificado como oleico-linoleico, semelhante aos acessos indianos e africanos.

Essa composição lipídica influencia na cadeia produtiva do biodiesel, devido à estabilidade oxidativa e propriedades físico-químicas dos ácidos graxos, sendo desejado o uso de sementes com maiores teores de ácido linoleico (JAIN; SHARMA, 2011).

Nas análises de modelos mistos foram utilizados os dados obtidos na composição química das sementes (carboidratos, proteínas e lipídios) e os principais ácidos graxos (ácidos oleico e linoleico). Nas estimativas via REML, a variância aditiva foi a maior contribuinte para a variância fenotípica nos caracteres lipídicos, indicando a parte herdável da variância genotípica (Tabela 1). Nesses caracteres, a variância ambiental pouco influenciou na manifestação fenotípica. Nos caracteres de carboidratos e proteínas, a variância fenotípica foi influenciada pela variância ambiental, correspondendo a parte não herdável da variância fenotípica (Tabela 1).

**Table 1** - Variance components and genetic parameters in seed traits of ten half-sibling progeny of the physic nut (*Jatropha curcas*).

**Tabela 1** - Componentes de variância e parâmetros genéticos em caracteres de semente de dez progênies de meios-irmãos de pinhão-manso (*Jatropha curcas*)

Parameter	Trait				
	Carb	Prot	TL	Oleic	Linoleic
$\sigma^2_i$	52.62	5.26	2177.35	13654.34	1915.77
$\sigma^2_a$	22.53	1.23	1600.39	12698.53	1823.80
$\sigma^2_e$	30.09	4.03	576.96	955.81	91.97
$h^2_r$	0.42	0.23	0.73	0.93	0.95
$r_{gg}$	0.65	0.48	0.85	0.96	0.97
<b>CV<sub>gi</sub> (%)</b>	<b>78.32</b>	<b>26.09</b>	<b>28.08</b>	<b>37.21</b>	<b>28.73</b>
<b>CV<sub>e</sub> (%)</b>	<b>90.51</b>	<b>47.23</b>	<b>16.86</b>	<b>10.21</b>	<b>6.45</b>
<b>Mean</b>	<b>6.06</b>	<b>4.25</b>	<b>142.43</b>	<b>302.78</b>	<b>148.61</b>

Carb: carbohydrates; Prot: proteins; TL: total lipids;  $\sigma^2_i$ : individual phenotypic variance;  $\sigma^2_a$ : additive genetic variance;  $\sigma^2_e$ : residual variance;  $h^2_r$ : restricted heritability;  $r_{gg}$ : accuracy; CV<sub>gi</sub>: individual additive genetic coefficient of variation; CV<sub>e</sub>: residual coefficient of variation.

Carb: carboidratos; Prot: proteínas; LT (TL): lipídios totais;  $\sigma^2_i$ : variância fenotípica individual;  $\sigma^2_a$ : variância genética aditiva;  $\sigma^2_e$ : variância residual;  $h^2_r$ : herdabilidade restrita;  $r_{gg}$ : acurácia; CV<sub>gi</sub>: coeficiente de variação genética aditiva individual; CV<sub>e</sub>: coeficiente de variação residual.

Restricted heritability was high in the lipid variables, for which 73% of the observed phenotypic variance for total lipids was due to additive genetic causes, as well as 93% and 95% to additive genetic causes for the oleic and linoleic acids respectively. As a result, accuracy in these traits was also high, affording better genetic performance from selection of the best half-sibling progeny (Table 1).

The heritability coefficient is one of the main genetic parameters capable of estimating how much of the trait of interest will be transmitted to the offspring due to their genetic nature (RESENDE, 2007). Heritability and accuracy presented higher values for the lipid traits, showing that this parameter correlates the genetic value of an individual with its phenotype (ROCHA *et al.*, 2012), and can be modified in order to maximise genetic gain based on the aims of the breeder (RESENDE, 2007).

The coefficient of variation was estimated in order to compare the variability of each trait and to infer the genetic differences within each treatment. The individual additive genetic variance for carbohydrates, proteins and total lipids showed that these traits must be governed by many genes, as there was a predominance of the residual coefficient of variation. In contrast, for selection, the fatty acids showed high values for additive variance, there being greater additive differences within each progeny, i.e. greater genetic variability in these traits (Table 1).

In the REML analysis, it was found that the lipid traits gave promising results, including phenotypic variance attributed to the genetic and additive variance within each half-sibling progeny. These results are similar to those reported by Singh *et al.* (2016), in which the levels of fatty acids were attributed to genotypic variance in Indian genotypes of the physic nut. These effects show that the lipid characteristics are suitable for selection, and present similarities between the Brazilian and Indian accessions.

In predicting genetic components using BLUP, the genotypic values of  $u+g$  were predicted in the absence of environmental effects, where  $u$  is the general mean of the trait, and  $g$  is the genotypic effect (Figure 2). In the BLUP model for carbohydrates, positive genotypic effects were seen for the JCCE037 and JCCE069 progeny, showing them to be the most suitable genotypes for selection of this trait (Figure 2a). In contrast, the other progeny had a negative genotypic effect due to their low carbohydrate concentration (Figure 2a).

A herdabilidade restrita apresentou alta magnitude nas variáveis lipídicas, em que 73% da variação fenotípica observada foi decorrente de causas genéticas aditivas para lipídios totais, bem como de 93 e 95% de causas genéticas aditivas para os ácidos oleico e linoleico, respectivamente. A acurácia, conseqüentemente, também foi alta nesses caracteres, corroborando para que haja uma melhor performance genética a partir da seleção das melhores progênies de meios-irmãos em pinhão-mansão (Tabela 1).

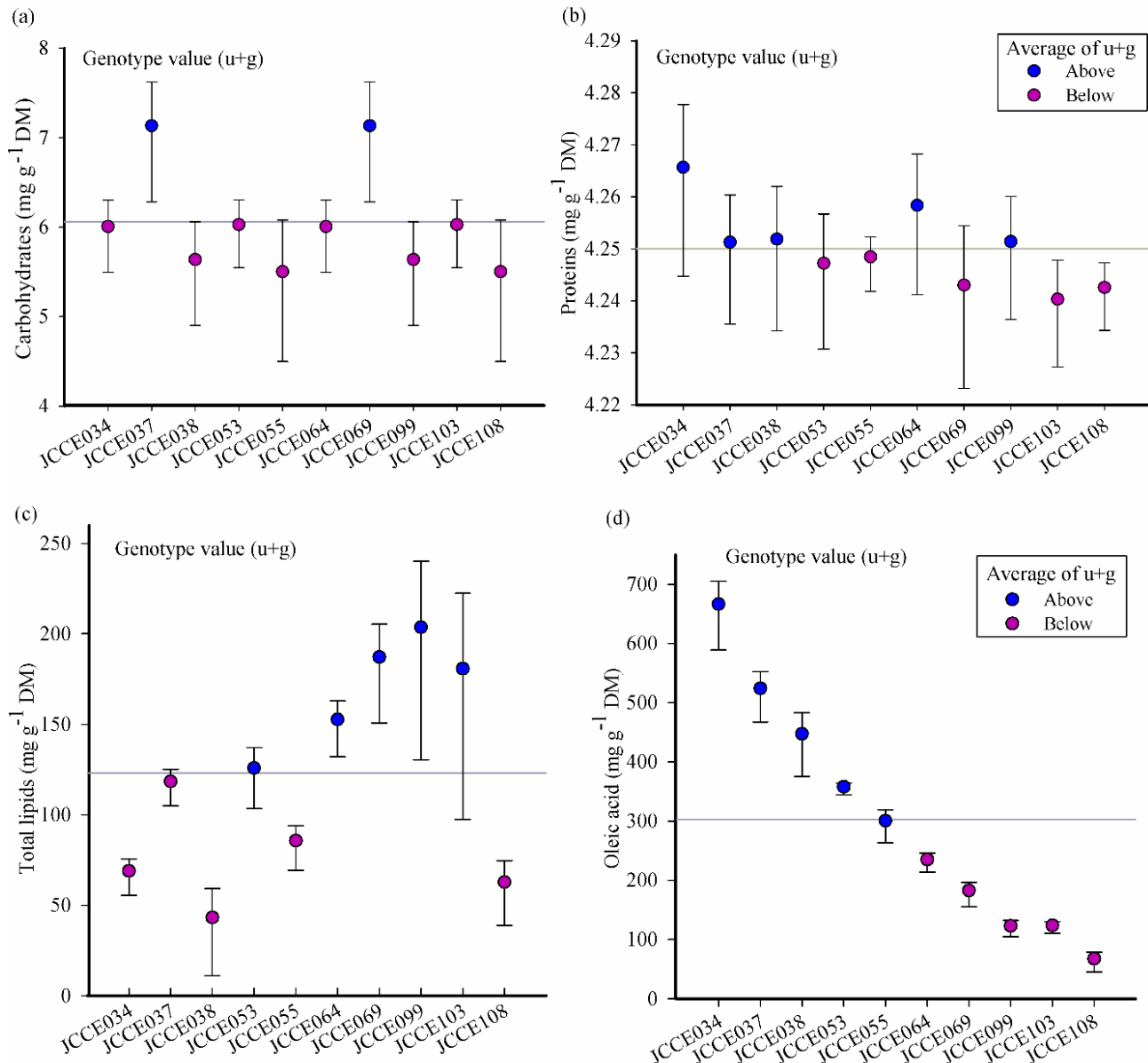
O coeficiente de herdabilidade consiste em um dos principais parâmetros genéticos capazes de estimar o quanto do caráter de interesse será transmitido à descendência devido à natureza genética (RESENDE, 2007). A herdabilidade e acurácia apresentaram maiores valores para os caracteres lipídicos, demonstrando que esse parâmetro correlaciona o valor genético do indivíduo ao seu fenótipo (ROCHA *et al.*, 2012) e pode ser alterado no intuito de maximizar o ganho genético de acordo com os objetivos do melhorista (RESENDE, 2007).

O coeficiente de variação foi estimado objetivando comparar a variabilidade de cada caráter e inferir as diferenças genéticas dentro dos tratamentos. A variação genética aditiva individual para carboidratos, proteínas e lipídios totais indicou que os caracteres devem ser governados por muitos genes, pois houve predomínio do coeficiente de variação residual. Em contraste, os ácidos graxos apresentaram altos valores da variação aditiva para seleção, existindo maiores diferenças aditivas dentro de cada progênie, ou seja, maior variabilidade genética para esses caracteres (Tabela 1).

Nas análises REML, observou-se que os caracteres lipídicos revelaram resultados promissores, havendo variações fenotípicas atribuídas às variações genéticas e variações aditivas dentro das progênies de meios-irmãos. Esses resultados são semelhantes aos relatados por Singh *et al.* (2016), em que teores dos ácidos graxos foram atribuídos às variâncias genotípicas em genótipos indianos de pinhão-mansão. Esses efeitos indicam que os caracteres lipídicos são favoráveis à seleção e apresentam semelhanças entre os acessos brasileiros e indianos.

Na predição dos componentes genéticos, via BLUP, os valores genotípicos de  $u+g$  foram preditos na ausência de efeitos ambientais, em que  $u$  é a média geral do caráter e  $g$  é o efeito genotípico (Figura 2). No modelo BLUP, para carboidratos, foram observados efeitos genotípicos positivos para as progênies JCCE037 e JCCE069, indicando serem os genótipos mais indicados para seleção desse caráter (Figura 2a). Em contraste, as demais progênies obtiveram efeito genotípico negativo, possuindo baixas concentrações de carboidratos (Figura 2a).





**Figure 2** - Prediction of genotypic values for carbohydrates (a), proteins (b), total lipids (c) and oleic acid (d) in seeds of ten half-sibling progeny of the physic nut (*Jatropha curcas*).

**Figura 2** - Predição de valores genotípicos para carboidratos (a), proteínas (b), lipídios totais (c) e ácido oleico (d) em sementes de dez progênies de meios-irmãos de pinhão-mansão (*Jatropha curcas*).

For proteins, 50% of the progeny are suitable for selection, having genotypic values above the average for this trait (Figure 2b). In the BLUP model for total lipids, positive genotypic effects were seen in half the progeny, indicating five progeny that are more suitable for selection. In contrast, four progeny had a negative genotypic effect due to the low concentration of lipids (Figure 2c).

Para proteínas, 50% das progênies são favoráveis à seleção, possuindo valores genotípicos acima da média para esse caráter (Figura 2b). No modelo BLUP, para lipídios totais, foram observados efeitos genotípicos positivos para a metade das progênies, indicando cinco progênies mais favoráveis para seleção. Em contraste, quatro progênies obtiveram efeito genotípico negativo, possuindo baixas concentrações de lipídios (Figura 2c).

The progeny with the most favourable BLUP for oleic acid were JCCE034, JCCE037, JCCE038 and JCCE053, with a genotypic value greater than 300 mg g<sup>-1</sup> DM. The JCCE064, JCCE069, JCCE099, JCCE103 and JCCE108 progeny showed no genetic progress for this trait, and should not be indicated for the purpose of selection (Figure 2d).

Considering the additive genetic effect, the carbohydrate trait showed little genetic progress for most of the half-sibling progeny, so that only selection of the JCCE037 and JCCE069 progeny would result in positive genetic gains in subsequent generations. The additive genetic effect of these progeny was positive, resulting in genetic gains of around 11%, which represented an increase in the new mean value for carbohydrates of 68.6 mg g<sup>-1</sup> DM (Table 2).

As progênies com os BLUPs mais favoráveis para o ácido oleico foram JCCE034, JCCE037, JCCE038 e JCCE053, apresentando valores genotípicos superiores a 300 mg g<sup>-1</sup> MS. As progênies JCCE064, JCCE069, JCCE099, JCCE103 e JCCE108 não apresentaram progresso genético para esse caractere e não devem ser indicadas para fins de seleção (Figura 2d).

Considerando o efeito genético aditivo, o caráter carboidrato apresentou baixo progresso genético para a maioria das progênies de meios-irmãos, de modo que somente a seleção das progênies JCCE037 e JCCE069 resultaria em ganhos genéticos positivos nas gerações seguintes. Essas progênies obtiveram um efeito positivo genético aditivo, resultando em ganhos genéticos em torno de 11% que representaram acréscimos na nova média de carboidratos para 68,6 mg g<sup>-1</sup> MS (Tabela 2).

**Table 2** - Genotypic components and genetic gains (mg g<sup>-1</sup> DM) for chemical composition in seeds of ten half-sibling progeny of the physic nut (*Jatropha curcas*)

**Tabela 2** - Componentes genotípicos e ganhos genéticos (mg g<sup>-1</sup> MS) para composição química em sementes de dez progênies de meios-irmão de pinhão-manso (*Jatropha curcas*)

HSP	Carbohydrates			PMI	Proteins		
	a	GG (mg g <sup>-1</sup> DM)	NMV (mg g <sup>-1</sup> DM)		a	GG (mg g <sup>-1</sup> DM)	NMV (mg g <sup>-1</sup> DM)
JCCE037	0.803	0.803	68.6	JCCE034	0.0118	0.0118	42.6
JCCE069	0.803	0.803	68.6	JCCE064	0.0062	0.009	42.6
JCCE053	-0.025	0.527	65.9	JCCE038	0.0014	0.0065	42.6
JCCE103	-0.025	0.389	64.5	JCCE099	0.0011	0.0051	42.5
JCCE034	-0.041	0.303	63.6	JCCE037	0.0011	0.0043	42.5
JCCE064	-0.041	0.245	63.0	JCCE055	-0.0012	0.0034	42.5
JCCE038	-0.318	0.1652	62.2	JCCE053	-0.0021	0.0026	42.5
JCCE099	-0.318	0.1047	61.6	JCCE069	-0.0053	0.0016	42.5
JCCE108	-0.419	0.0466	61.1	JCCE108	-0.0056	0.0008	42.6
Total lipids				Oleic acid			
JCCE103	23.77	23.77	166.20	JCCE034	223.56	223.56	526.34
JCCE069	8.34	16.05	158.48	JCCE037	45.33	134.44	437.23
JCCE099	7.14	13.08	155.51	JCCE038	40.85	103.25	406.03
JCCE064	0.95	10.05	152.48	JCCE064	15.68	81.36	384.14
JCCE053	-0.49	7.94	150.37	JCCE099	-19.30	61.22	364.01
JCCE037	-3.90	5.96	148.39	JCCE055	-19.49	47.77	350.56
JCCE055	-4.03	4.54	146.97	JCCE069	-23.93	37.52	340.31
JCCE034	-4.30	3.43	145.86	JCCE053	-67.37	24.41	327.20
JCCE038	-9.65	1.98	144.41	JCCE108	-80.84	12.72	315.50

HSP: half-sibling progeny; a: additive genetic effect; GG: genetic gains; NMV: new mean value for the trait after the genetic gain.

PMI (HSP): progênies de meios-irmãos; a: Efeito genético aditivo; GG: ganhos genéticos; NMV: nova média do valor após o ganho genético.

For protein, the genotypic components were close in all progeny, affording genetic gains by selection of the first five progeny, so that the new mean values for protein concentration after selection would be 42.5 and 42.6 mg g<sup>-1</sup> DM. For total lipids, the JCCE103, JCCE069, JCCE099 and JCCE064 progeny had a positive additive genetic effect and the best genetic progress, resulting in an increase in the new mean value for lipids to values greater than 150 mg g<sup>-1</sup> DM. The JCCE034, JCCE037, JCCE038 and JCCE064 progeny had the highest predicted values for oleic acid, making it possible to achieve the best gains by their selection (Table 2).

Considering the predictions made in this study, genetic variability exists between the progeny. Based on the trait to be selected, there are progeny that afford better genetic gains, making it possible to increase the mean value of these traits in the next generation. Selecting the JCCE103, JCCE069, JCCE099 and JCCE064 progeny gives better genetic progress in oil yield, while selecting JCCE034, JCCE037, JCCE038 and JCCE064 results in better genetic progress in the quality of that oil.

To achieve genetic gains, REML/BLUP analysis was applied in predicting the variance components and genotypic values. This methodology is used as a reference in breeding different species as it considers imbalanced data and increases the accuracy of the genetic estimates (RESENDE, 2016). The genotypic values were predicted individually, while the genetic relationship between the individuals of the physic nut, and the coincidence between their selectable traits, were observed.

Genetic progress for lipid traits in the physic nut was predicted by Singh *et al.* (2016), with a gain of 16.15% in the oil content, and of 4.27% and 9.37% in oleic acid and linoleic acid respectively. In the physic nut, studies on genetic gains for lipid traits are scarce (SINGH *et al.*, 2016), since, in the literature, genetic gains are reported for the morphological and productive traits (BORGES *et al.*, 2014; PEIXOTO *et al.*, 2017).

The success of breeding programs depends on identifying and selecting promising genotypes in the germplasm. The parameters under evaluation in this study showed that seed traits are able to achieve satisfactory genetic gains. These results aid in the selection of strategies to be adopted in breeding *J. curcas* for oil yield and quality, and in minimising the bottleneck effects caused by the exclusive selection of yield traits.

Para o caráter proteína, os componentes genotípicos foram próximos em todas as progênes, proporcionando ganhos genéticos com a seleção das primeiras cinco progênes, de modo que as novas médias nas concentrações de proteínas, após a seleção, serão de 42,5 e 42,6 mg g<sup>-1</sup> MS. Nos lipídios totais, as progênes JCCE103, JCCE069, JCCE099 e JCCE064 obtiveram efeito genético aditivo positivo e os melhores progressos genéticos, resultando em acréscimos na nova média de lipídios para valores acima de 150 mg g<sup>-1</sup> MS. As progênes JCCE034, JCCE037, JCCE038 e JCCE064 obtiveram os melhores valores preditos para o ácido oleico, possibilitando obter os melhores ganhos com a seleção (Tabela 2).

Considerando as predições realizadas nesse estudo, há variabilidade genética entre as progênes. De acordo com o caráter a ser selecionado, há progênes que proporcionam melhores ganhos genéticos, possibilitando aumentar a média desses caracteres na geração seguinte. A seleção das progênes JCCE103, JCCE069, JCCE099 e JCCE064 proporcionam melhores progressos genéticos visando a produção de óleo, e a seleção de JCCE034, JCCE037, JCCE038 e JCCE064 proporcionam melhores progressos genéticos visando a qualidade desse óleo.

Na obtenção de ganhos genéticos, aplicaram-se as análises REML/BLUP na predição dos componentes de variância e valores genotípicos. Essa metodologia é usada como referência no melhoramento de diferentes espécies por considerar o desequilíbrio de dados e aumentar a precisão das estimativas genéticas (RESENDE, 2016). Os valores genotípicos foram preditos individualmente e se observou a relação genética entre os indivíduos de pinhão-manso e a coincidência entre os caracteres passíveis de seleção.

Progressos genéticos para caracteres lipídicos, em pinhão-manso, foram preditos por Singh *et al.* (2016), em que os teores de óleo obtiveram ganhos de 16,15% e os de ácidos oleico e linoleico de 4,27 e 9,37%, respectivamente. Estudos sobre os ganhos genéticos de caracteres lipídicos são escassos em pinhão-manso (SINGH *et al.*, 2016), visto que na literatura científica são relatados ganhos genéticos para caracteres morfológicos e produtivos (BORGES *et al.*, 2014; PEIXOTO *et al.*, 2017).

O sucesso dos programas de melhoramento depende das etapas de identificação e seleção de genótipos promissores nos germoplasma. Os parâmetros avaliados neste trabalho demonstraram que os caracteres de sementes são capazes de alcançar satisfatórios ganhos genéticos. Esses resultados auxiliam nas estratégias de seleção a serem adotadas no melhoramento de *J. curcas* visando produção e qualidade de óleo e minimizando efeitos de gargalo ocasionados pela seleção excludente em caracteres de rendimento.

## CONCLUSIONS

Seeds of the physic nut consist of energy reserves that are rich in oleic and linoleic acids, with fatty chains for the production of biofuels;

The lipid traits can be selected for the purpose of breeding, resulting in genetic progress in the yield and quality of physic-nut oil.

## CONCLUSÕES

As sementes de pinhão-mansão são constituídas de reservas energéticas ricas em ácidos oleico e linoleico, com cadeias graxas destinadas à produção de biocombustíveis;

Os caracteres lipídicos são passíveis de seleção, para fins de melhoramento, resultando em progressos genéticos para produção e qualidade de óleo de pinhão-mansão.

## CITED SCIENTIFIC LITERATURE

ALBURQUERQUE, N.; GARCÍA-ALMODÓVAR, R. C.; VALVERDE, J. M.; BURGOS, L.; MARTÍNEZ-ROMERO, D. Characterization of *Jatropha curcas* accessions based in plant growth traits and oil quality. **Industrial Crops and Products**, v. 109, n. 2017, p. 693-698, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.019>

ANDRADE, I. P. S.; FOLEGATTI, M. V.; SANTOS, O. N. A.; FANAYA, J.; BARISON, A.; SANTOS, A. D. C. Fatty acid composition of *Jatropha curcas* seeds under different agronomical conditions by means of <sup>1</sup>H HR-MAS NMR. **Biomass and Bioenergy**, v. 101, p. 30-34, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.006>

AQUINO, A. B.; AQUINO, B. F.; HERNANDEZ, F. F. F.; HOLANDA, F. J. M.; FREIRE, J. M.; CRISÓSTOMO, L. A.; COSTA, R. I.; UCHÔA, S. C. P.; FERNANDES, V. L. B. Recomendações de adubação e calagem para o estado do Ceará. 1.ed. Fortaleza: UFC, 1993. 248 p.

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A. A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**, v. 37, n. 8, p. 911-917, 1959.

BORAH, N.; MAPELLI, S.; PECCHIA, P.; MUDOI, K. D.; CHALIHA, B.; GOGOI, A.; DOLEY, A.; KOTOKY, R.; SAIKIA, S. P. Variability of growth and oil characteristics of *Jatropha curcas* L. in North-east India. **Biofuels**, p. 1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1472979>

BORGES, C. V.; FERREIRA, F. M.; ROCHA, R. B.; DOS SANTOS, A. R.; LAVIOLA, B. G. Capacidade produtiva e progresso genético de pinhão-mansão. **Ciência Rural**, v. 44, n. 1, p. 64-70, 2014.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, p. 248-254, 1976.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos Biométricos aplicados ao Melhoramento Genético**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2012. 514p.

JAIN, S.; SHARMA, M. P. Study of oxidation stability of *Jatropha curcas* biodiesel/ diesel blends. **International Journal of Energy and Environment**, v. 2, n. 3, p. 533-542, 2011.

JONAS, M.; KETLOGETSWE, C.; GANDURE, J. Variation of *Jatropha curcas* seed oil content and fatty acid composition with fruit maturity stage. **Heliyon**, v. 6, n.1, p. 1-6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03285>

KUMAR, R.; DAS, N. Seed oil of *Jatropha curcas* L. germplasm: Analysis of oil quality and fatty acid composition. **Industrial Crops and Products**, v. 124, p. 663-668, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.031>

MAIA, E. L.; RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. Avaliação de um método simples e econômico para a metilação de ácidos graxos com lipídios de diversas espécies de peixes. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 53, n. 1/2, p. 27-35, 1993.

MARTINS, M. T. C. S.; PÔRTO, N. A.; CANUTO, M. F. S.; BRUNO, R. L. A. Composição química de sementes de espécies de *Manihot* Mill. (Euphorbiaceae). **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, supl. 1, p. 621-623, 2007.

- ORTIZ, R.; GELETA, M.; GUSTAFSSON, C.; LAGER, I.; HOFVANDER, P.; LOFSTEDT, C.; CAHOON, E.B.; MININA, E.; BOZHKOVA, P.; STYMNE, S. Oil crops for the future. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 56, p. 181–189, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.003>
- PEIXOTO, L. A.; LAVIOLA, B. G.; ALVES, A. A. A.; ROSADO, T. B.; BHERING, L. L. Breeding *Jatropha curcas* by genomic selection: A pilot assessment of the accuracy of predictive models. **PLOS ONE**, v. 12, n. 3, p. 1-16, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0173368>
- RESENDE, M. D. V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. 1. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 561p.
- RESENDE, M. D. V. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 16, p. 330-339, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49>
- ROCHA, R. B.; RAMALHO, A. R.; TEIXEIRA, A. L.; LAVIOLA, C. G.; SILVA, F. C. G.; MILITÃO, J. S. L. T. Eficiência da seleção para incremento do teor de óleo do pinhão-mansão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 1, p. 44-50, 2012.
- SENGER, E.; BOHLINGER, B.; ESGAIB, S.; HERNANDEZ-CUBERO, L. C.; MONTES, J.M.; BECKER, K. Chuta (edible *Jatropha curcas* L.), the newcomer among underutilized crops: a rich source of vegetable oil and protein for human consumption. **European Food Research and Technology**, v. 243, p. 987-997, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2814-x>
- SINGH S.; PRAKASH, A.; CHAKRABORTY, N. R.; WHEELER, C.; AGARWA, P. K.; GHOSH, A. Genetic variability, character association and divergence studies in *Jatropha curcas* for improvement in oil yield. **Trees**, v. 30, n. 4, p. 1163-1180, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1354-0>
- SOUZA, L. M.; MENDES, P.; ARANDA, D. Assessing the current scenario of the Brazilian biojet Market. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 98, p. 426-438, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.039>
- WAHYUDI; WARDANA, I. N. G.; WIDODO, A.; WIJAYANTI, W. Improving vegetable oil properties by transforming fatty acid chain length in *Jatropha* oil and coconut oil blends. **Energies**, v. 11, n. 394, p. 1-12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11020394>
- WASSNER, D.; BORRÁS, M.; VACA-GARCIA, C.; PLOSCHUK, E. Harvest date modifies seed quality and oil composition of *Jatropha curcas* growth under subtropical conditions in Argentina. **Industrial Crops and Products**, v. 94, n. 2016, p. 318-326, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.001>
- YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, v. 57, p. 508-514, 1954.