



Models for estimating leaf area in the 'Palmer' mango

Modelos para a estimativa da área foliar de mangueira cv. Palmer

José Luiz Santos da Silva Junior¹, Marcos Sales Rodrigues^{1*}, Gabriella Amaral Braga¹, Ester Silva Regis¹

Abstract: Techniques for measuring leaf area are basic for evaluating plant growth in the mango. As such, the aim of this study was to determine the leaf area of the 'Palmer' mango using mathematical models proposed by the present study, and compare the results of the proposed models with models available in the literature for other mango cultivars. The mango leaf was simulated as a function of leaf length (L) and width (W) using two distinct geometric models: an ellipse and a rosacea petal. Models found in the literature and determined for other cultivars, were also tested. The values for leaf area were obtained using the ImageJ software and taken at their actual value; these were later compared with the values achieved by the geometric models. The models were tested for quality of prediction through cross-validation. The models proposed in the present study were not superior to the best models found in the literature. The model $LA = 3.80 + 0.67 (LW)$ achieved the best performance, with a mean absolute percentage error (MAPE) of 3.78%. Using only length, the best model was $LA = 0.0142C^2 + 6.1902C - 49.444$, with a MAPE of 4.07%. The use of mathematical models proved to be a suitable option for estimating leaf area in the 'Palmer' mango. Moreover, the use of R^2 as the only form of model quality assessment can lead to errors in choosing the best model.

Key words: Fruit farming. *Mangifera indica* L. Mathematical modelling. Semi-arid region.

Resumo: Técnicas para medir a área foliar são fundamentais na avaliação do crescimento vegetal de plantas de mangueira. Sendo assim, os objetivos deste trabalho foram: determinar a área foliar de plantas de mangueira cv. Palmer utilizando modelos matemáticos propostos pelo presente trabalho e comparar os resultados dos modelos propostos com modelos disponíveis na literatura para outras cultivares de mangueira. Para isto, foi simulada a folha de mangueira por meio de dois modelos geométricos distintos: Elipse e uma pétala de rosácea, em função do comprimento (C) e largura (L) da folha. Também foram testados modelos já existentes na literatura, no caso, obtidos para outras cultivares. Foram obtidos com o emprego do software ImageJ os valores das áreas foliares, sendo adotados como seus valores reais e, posteriormente, comparados com os valores alcançados pelos modelos geométricos. Por meio da validação cruzada, foi testada a qualidade de predição dos modelos. Os modelos propostos pelo presente trabalho não foram superiores aos melhores modelos já existentes na literatura. O modelo $AF = 3,80 + 0,67 (CL)$ teve o melhor desempenho, com erro médio absoluto percentual (EMAP) de 3,78%. Utilizando-se apenas o comprimento, o melhor modelo foi o $AF = 0,0142C^2 + 6,1902C - 49,444$, com EMAP de 4,07%. Portanto, o uso de modelos matemáticos se mostrou uma adequada opção para a estimativa da área foliar de mangueira cv. Palmer. Adicionalmente, o uso do R^2 como única forma de avaliação de qualidade de modelos pode gerar erros na escolha do melhor modelo.

Palavras-chave: Fruticultura. *Mangifera indica* L.. Modelagem matemática. Semiárido.

*Corresponding author

Submitted for publication on 19/06/2019 and approved 29/10/2019

¹Colegiado de Engenharia Agrônoma, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Ciências Agrárias, Rodovia BR 407, Projeto de Irrigação-Nilo Coelho, CEP: 56300-990, Petrolina, Pernambuco, Brasil. E-mail: luiz.santos@univasf.edu.br; marcos.rodrigues@univasf.edu.br; gabriellamaral33@gmail.com; estersregis98@gmail.com.

INTRODUCTION

The São Francisco Valley is the main mango-producing region in Brazil, with Petrolina in Pernambuco and Juazeiro in Bahia the most important municipalities, since together they account for 22.1% of the cultivated area and 32.95% of domestic production (IBGE, 2017); a demonstration of their importance to domestic mango cultivation.

It is known that leaf area is related to water loss through transpiration, as the leaves are the principal organs responsible for gas exchange and the photosynthetic process, which depends on the absorption of light energy and its conversion to chemical energy (ARAÚJO *et al.*, 2005; GHOREISHI *et al.*, 2012; SCHMILDT *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2015). Techniques for measuring leaf area are therefore basic for evaluating plant growth in the mango.

Various methods, both destructive and non-destructive, have been used to measure or estimate leaf area. Among the destructive methods are the planimetric and the gravimetric, using the dry weight of the leaf and its ratio to the leaf area. Non-destructive methods include using the relationship between the linear measurements of the leaf and its area, the grid count method, photoelectric planimetry and photoelectric photographic planimetry (ARAÚJO *et al.*, 2005). Modern equipment exists for non-destructive methods that measure leaf area quickly and accurately, however, such equipment can be expensive, making it impossible to use on certain occasions (ARAÚJO *et al.*, 2005).

One low-cost and efficient alternative is the use of models or mathematical equations that offer good accuracy for estimating the actual leaf area as a function of linear dimension, such as the length, width or both (LIMA *et al.*, 2012). Using the linear dimensions of leaves of mango seedlings of the ‘Tommy Atkins’ and ‘Haden’ cultivars in Bonfim Paulista, in the state of São Paulo, Araújo *et al.* (2005) found regression models with coefficients of determination (R^2) that ranged from 0.85 to 0.99, again using the length, width or both. Lima *et al.* (2012), with the ‘Tommy Atkins’ cultivar in Salinópolis, Pará, found that models employing the variables of length and width presented an R^2 of between 0.90 and 0.97. Silva *et al.* (2015) found models with an R^2 of up to 0.97 for the ‘Haden’ cultivar in Alegre, Espírito Santo.

INTRODUÇÃO

O Vale do São Francisco é a principal região produtora de manga em nível nacional, Petrolina (PE) e Juazeiro (BA) são os principais municípios responsáveis por essa posição, pois, juntos, respondem por 22,1% da área de cultivo e 32,95% da produção nacional (IBGE, 2017). Isso demonstra sua importância na cultura da mangueira no cenário nacional.

Sabe-se que a área foliar está relacionada com a perda de água por transpiração, tendo em vista que as folhas são os principais órgãos responsáveis pelas trocas gasosas e pelo processo fotossintético, que depende da absorção de energia luminosa e sua conversão em energia química (ARAÚJO *et al.*, 2005; GHOREISHI *et al.*, 2012; SCHMILDT *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2015). Portanto, técnicas para medir a área foliar são fundamentais para avaliar o crescimento vegetal de plantas de mangueira.

Diversos métodos têm sido utilizados para medir ou estimar a área foliar. Sendo divididos em métodos destrutivos e não-destrutivos. Dentre os destrutivos estão: método planimétrico, método gravimétrico, utilização do peso seco da folha e de sua relação com a área foliar. Entre os métodos não-destrutivos destacam-se: utilização da relação entre as medidas lineares da folha e sua área, método de contagem de quadrados preenchidos pelo contorno das folhas, planimetria fotoelétrica e planimetria fotográfica fotoelétrica (ARAÚJO *et al.*, 2005). Para os métodos não destrutivos existem equipamentos modernos que fazem a medida da área foliar de forma ágil e precisa, todavia, tais equipamentos podem ser caros, inviabilizando o seu uso em determinadas ocasiões (ARAÚJO *et al.*, 2005).

Uma alternativa de baixo custo e eficiente é o uso de modelos ou equações matemáticas que apresentem boa precisão para estimar a área foliar real em função das dimensões lineares, como: comprimento, largura ou ambos (LIMA *et al.*, 2012). Empregando dimensões lineares de folhas de mudas de mangueira da cultivar Tommy Atkins e Haden em Bonfim Paulista- SP, Araújo *et al.* (2005) encontraram modelos de regressão usando o comprimento, largura ou ambos, com coeficientes de determinação (R^2) variando de 0,85 a 0,99. Lima *et al.* (2012), utilizando de folhas de mangueira cv. Tommy Atkins em Salinópolis- PA, verificaram que modelos com as variáveis comprimento e largura apresentaram R^2 entre 0,90 e 0,97. Silva *et al.* (2015) encontraram modelos com R^2 de até 0,97 para mangueiras da cv. Haden em Alegre- ES.

Studies found in the literature for estimating leaf area in the mango from measurements of length and width usually only show the fit of the model through the coefficient of determination (R^2). R^2 is a measure of the fit of a generalised linear statistical model, such as linear regression, relative to the observed values. However, using R^2 it is not possible to verify the error in estimating these values, and further measures must be taken to verify the precision and accuracy of the models. Therefore, using cross-validation, such as the root mean square error (RMSE) or even the mean absolute error (MAE), reduces the chances of error in choosing the model (CHAI; DRAXLER, 2014). As such, if the most important criterion for fitting the model is prediction, RMSE and MAE are more appropriate.

Furthermore, there are no studies in the literature on the 'Palmer' mango, which justifies the present study, since the planted area for this cultivar has been increasing in the region of the São Francisco Valley. The aim of this study, therefore, was to determine leaf area in the 'Palmer' mango using mathematical models, and to compare the results of the proposed models with models available in the literature for other mango cultivars using R^2 and the mean errors.

MATERIAL AND METHODS

The experiment was carried out in an experimental area of irrigated 'Palmer' mango (rootstock: pink mango) planted in 2016, at a spacing of 5.0 x 4.0 m, in the municipality of Petrolina, Pernambuco, in the region of the lower-mid São Francisco (9°18'58.80" S and 40°33'40.22" W; mean altitude of 400 m). According to the Köppen classification, the local climate is semi-arid, type BSh, with precipitation of less than 500 mm, which is concentrated over only three to four months of the year, and an annual mean temperature ranging from 18.7 to 33.6 °C (ALVARES *et al.*, 2013).

To carry out the study, 300 photosynthetically active and undamaged leaves were collected from approximately 50 plants, and separated from the plant at the insertion between the limb and petiole. The leaves were taken to one specific room, where they were photographed, and the length (L) and width (W) of each sample was measured using a 30 cm rule. The width was measured perpendicular to the central rib at the midpoint of the length of the leaf. A camera with a Nikon® AF-S 18-55mm lens was used for the photographs, supported at a height of 30 cm by a base covered in matte white paper.

Os trabalhos encontrados na literatura para estimar a área foliar na cultura da mangueira com medidas de comprimento e largura, geralmente, apresentam apenas o ajuste do modelo pelo coeficiente de determinação (R^2). O R^2 é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados. Contudo, por meio dele não é possível verificar o erro na estimativa dos valores. Para tanto, outras medidas devem ser adotadas para verificar a precisão e acurácia dos modelos. Assim, utilizar a validação cruzada, tais como raiz do erro quadrático médio (RQEM) ou, ainda, o erro médio absoluto (EMA), reduz as chances de erro na escolha do modelo (CHAI; DRAXLER, 2014). Portanto, se o critério mais importante do ajuste do modelo for a predição, o RQEM e EMA são mais adequadas.

Adicionalmente, não há trabalhos na literatura com mangueiras da cv. Palmer, o que justifica o presente estudo, já que a área plantada dessa cultivar tem crescido na região do Vale do São Francisco. Assim, objetivou-se com este trabalho determinar a área foliar de plantas de mangueira cv. Palmer utilizando modelos matemáticos e comparar os resultados dos modelos propostos com modelos disponíveis na literatura para outras cultivares de mangueira utilizando R^2 e os erros médios.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em uma área experimental de mangueira irrigada cv. Palmer (hipobioto: manga rosa) implantada em 2016, com espaçamento de 5,0 x 4,0 m, no município de Petrolina-PE, região do Submédio São Francisco (latitude 9° 18' 58,80" S e longitude 40° 33' 40,22" O, altitude média de 400 m). Segundo a classificação de Köppen, o clima local é do tipo BSh, semiárido, com precipitação inferior a 500 mm, concentrados apenas em três a quatro meses do ano e médias anuais de temperaturas variando entre 18,7 e 33,6 °C (ALVARES *et al.*, 2013).

Para realização do estudo, foram coletadas 300 folhas fotossinteticamente ativas e não danificadas, separadas das demais partes da planta na inserção entre o limbo e o pecíolo, em aproximadamente 50 plantas. As folhas foram transportadas até sala específica onde foram fotografadas e medidos o comprimento (C) e a largura (L) de cada amostra usando régua de 30 cm. A largura foi medida perpendicularmente à nervura central, no ponto médio do comprimento da folha. Para as fotografias, foi utilizada uma câmera com lente Nikon® AF-S 18-55mm fixada por um suporte a 30 cm de altura de uma base coberta por papel branco fosco.

Due to the curved shape of the leaf, a 30 x 30 x 0.5 cm clear glass slide was used to flatten each leaf and obtain more accurate measurements from the generated images; in addition, the leaves were photographed at a resolution of 300 dpi. The digital images were processed with the aid of the ImageJ software, so that, for each leaf, the area (A) could be measured, and the values taken as actual measurements.

Two geometric models were used to approximate the leaf shape in two ways: in the first model, the leaf was considered an ellipse (AMAZONAS *et al.*, 2008), and its area calculated as a function of the length of the major axis (L), as per Equation 1.

$$AE = 0.22 (C)^2 \quad (1)$$

Equation 1 was obtained by equating the area of the ellipse as a function of the length of the major axis (L) and the eccentricity (e), given by Equation 2.

$$A = \pi^2 \sqrt{1 - e^2} \left(\frac{C}{2}\right)^2 \quad (2)$$

As the aim was to determine a model that depended only on length (L), the mean eccentricity of the leaves (e_m) was used, equal to 0.96, considered an ellipse, giving Equation 3; this was then used to perform the operations on the constants resulting from equation 1.

$$A = \pi^2 \sqrt{1 - (0.96)^2} \left(\frac{C}{2}\right)^2 \quad (3)$$

In the second model, considering the leaf as one petal of a five-petal rosacea, the area was determined by Equation (4).

$$A = C^2 \cdot 0.157 \quad (1)$$

The area of a rosacea petal can be obtained as a function of its length (L) and the number n , which represents the number of petals of the rosacea when n is odd, or half the number of petals when n is even, as per Equation 5.

$$A = C^2 \pi/4n \quad (5)$$

The number n of rosacea leaves used for the most satisfactory approximation was found by calculating the area for various values of n , where it was found that for the present dataset $n = 5$ produces a smaller error in relation to the actual measurements. Substituting $n = 5$ in Equation 5 gives Equation 4.

Devido ao formato curvo da folha, utilizou-se uma lâmina de vidro transparente de 30 x 30 x 0,5 cm para planificar a folha, de modo a se obter medidas mais precisas a partir das imagens geradas. Além disso, as folhas foram fotografadas com resolução de 300 dpi. As imagens digitais obtidas foram tratadas com o auxílio do software ImageJ, de modo a medir a área (A) de cada uma das folhas, cujos valores foram adotados como medidas reais.

Foram utilizados dois modelos geométricos para aproximar o formato da folha de duas maneiras: no primeiro foi considerado a folha como uma elipse (AMAZONAS *et al.*, 2008) e calculado sua área em função do comprimento do eixo maior (C), segundo a Equação (1).

A equação (1) foi obtida por meio da equação da área da elipse em função do comprimento do eixo maior (C) e da excentricidade (e), dada pela Equação (2).

Com efeito, como o objetivo é determinar um modelo que dependa somente do comprimento (C), usou-se a excentricidade média das folhas (e_m) igual a 0,96, considerada como elipse, obtendo a Equação (3), que efetuadas as operações com as constantes resultantes da equação (1).

No segundo modelo, considerando a folha como uma pétala de uma rosácea de cinco pétalas, a área foi determinada pela Equação (4).

A área de uma pétala de uma rosácea pode ser obtida como função do seu comprimento (C) e do número n , que representa o número de pétalas da rosácea, caso n seja ímpar, ou metade do número de pétalas, caso n seja par, segundo a Equação (5).

O número n de folhas da rosácea utilizada para a aproximação mais adequada foi encontrado calculando-se as áreas para vários valores de n e verificando que para o presente conjunto de dados $n = 5$ produz um menor erro com relação às medidas reais encontradas. Substituindo-se $n=5$ em (5), obtêm-se (4).

In addition, the models presented above were compared to 23 other models found in the literature (ARAÚJO *et al.*, 2005; LIMA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2015). To evaluate the performance of the models in attempting to estimate leaf area, the following were used: the coefficient of determination R^2 ; the root mean square error (RMSE), representing the error of one unit of the variable (LI; HEAP, 2011); the mean absolute error (MAE) (CHAI; DRAXLER, 2014) and the mean absolute percentage error (MAPE) (MYTTENAERE *et al.*, 2016).

RESULTS AND DISCUSSION

The descriptive analysis of the data for length, width and leaf area in the 'Palmer' mango is shown in Table 1. The results of the present study were similar to those found by Silva *et al.* (2015) for the 'Haden' cultivar, with a mean value of 21.90 cm, 5.8 cm and 90.56 cm² for the length, width and area respectively.

Table 1 - Descriptive analysis of the 'Palmer' mango

Tabela 1 - Análise descritiva dos dados das folhas de mangueira cv. Palmer

Variable	Mean	Maximum	Minimum	Coefficient of Variation (%)
Length (cm)	21.3	29.3	13.4	13.22
Width (cm)	6.1	9.7	3.7	16.76
Leaf area (cm ²)	90.1	187.44	35.18	28.42

The results were also similar to those found by Lima *et al.* (2012) for the 'Tommy Atkins' cultivar, of 21 cm, 5.08 cm and 77.98 cm² for length, width and leaf area respectively. Although Rymbai *et al.* (2014) found morphological differences in mango cultivars from India, the results of the present study show that the morphology of mango leaves does not change very much between cultivars, which allows the use of the same models for different cultivars.

Based on the classification by Pimentel-Gomez and Garcia (2002), the variables of length and width were classified as of medium variability (CV between 10 and 20%), while leaf area was classified as of high variability (CV between 20 and 30%). These results, together with the maximum and minimum values, indicate that even adult mango leaves display a certain variability in size, width and length.

Adicionalmente, foram comparados os modelos apresentados acima com outros 23 modelos encontrados na literatura (ARAÚJO *et al.*, 2005; LIMA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2015). Para avaliar o desempenho dos modelos na tentativa de estimar a área foliar, foram utilizados o coeficiente de determinação R^2 , raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), que representa o erro na unidade da variável (LI; HEAP, 2011), erro médio absoluto (EMA) (CHAI; DRAXLER, 2014) e o EMAP (Erro médio absoluto percentual) (MYTTENAERE *et al.*, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise descritiva dos dados de comprimento, largura e área foliar da mangueira cv. Palmer é apresentada na Tabela 1. Os resultados do presente estudo foram semelhantes aos encontrados por Silva *et al.* (2015) para a cv. Haden, que encontraram valores médios de 21,90; 5,8 cm; e 90,56 cm² para o comprimento, largura e área foliar, respectivamente.

Os resultados também foram semelhantes aos encontrados por Lima *et al.* (2012) para a cv. Tommy Atkins, os quais foram de 21; 5,08 cm e 77,98 cm² para o comprimento, largura e área foliar, respectivamente. Apesar de Rymbai *et al.* (2014) encontrarem diferenças morfológicas em cultivares de manga da Índia, os resultados do presente estudo demonstram que a morfologia das folhas de mangueira não se altera consideravelmente entre as cultivares, o que possibilita o uso dos mesmos modelos em diferentes cultivares.

Com base na classificação de Pimentel-Gomez e Garcia (2002), as variáveis comprimento e largura foram classificadas como de média variabilidade (CV entre 10 e 20%), enquanto a área foliar foi classificada como de alta variabilidade (CV entre 20 e 30%). Estes resultados, conjuntamente com os valores de máximo e mínimo, indicam que mesmo as folhas adultas de mangueira possuem certa variabilidade quanto ao tamanho, largura e comprimento.

The models proposed by the authors were not superior to some of the models found in the literature, as can be seen from the quality indices of the models shown in Tables 2 and 3. This is possibly due to the geometric shape of the ellipse and the five-petal rosacea not being an exact representation of the shape of the leaf of the 'Palmer' mango.

Verifying the results for R^2 and the errors of the models shows that using only R^2 as a measure of model quality may not be efficient. Some models with an R^2 close to 1 showed large errors. Model M_2 presented an R^2 of 0.745, the furthest from 1, but with a mean absolute error of 11.23%, and the third best result among the models with one independent variable (Table 2). Whereas model M_{15} , with an R^2 of 0.958 (Table 3), close to 1, had a mean absolute error of 12.73%.

Of the studies estimating leaf area in the mango using mathematical models, most present only the coefficient of determination (ARAÚJO *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2015), and do not provide enough information concerning the choice of model or how much the values estimated by the model represent reality. The practice of using the coefficient of determination when choosing models is recurrent in agrarian science, leading to errors in understanding the precision and accuracy of the models.

Os modelos propostos pelos autores não foram superiores a alguns modelos encontrados na literatura, conforme observado nos índices de qualidade dos modelos apresentados nas Tabelas 2 e 3. Isso se deve, possivelmente, ao fato das formas geométricas da elipse e da rosácea de cinco pétalas não serem a representação exata da forma da folha de mangueira cv. Palmer.

Observando os resultados do R^2 e dos erros dos modelos, verifica-se que o uso apenas do R^2 como medida de qualidade do modelo pode não ser eficiente. Alguns modelos com R^2 próximo a 1 apresentaram erros elevados. O modelo M_2 apresentou R^2 de 0,745, mais distante de 1, mas com erro médio absoluto de 11,23%, sendo o terceiro melhor resultado entre os modelos de uma variável independente (Tabela 2). Já o modelo M_{15} , com um R^2 de 0,958 (Tabela 3), próximo de 1, apresentou erro médio absoluto de 12,73%.

Entre os trabalhos de estimação de área foliar de mangueira com modelos matemáticos, a maior parte deles apresenta apenas o coeficiente de determinação (ARAÚJO *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2015), não fornecendo informações suficientes quanto a tomada de decisão na escolha do modelo e o quanto dos valores estimados por este modelo representa a realidade. Essa prática de uso do coeficiente de determinação para a escolha de modelos é recorrente nos trabalhos de ciências agrárias acarretando erros no entendimento da precisão e acurácia dos modelos.

Table 2 - Quality indices of the models with one independent variable for estimating leaf area in the 'Palmer' mango

Tabela 2 - Índices de qualidade dos modelos com uma variável independente para a estimativa da área foliar de mangueira cv. Palmer

Model	Formula	R^2	RMSE	MAE	MAPE
M_1	$AF = 0.22(C)^2$	0.745	19.18	15.62	18.05 ⁽¹⁾
M_2	$AF = \frac{C^2 \pi}{4n} = C^2 0.157$	0.745	13.21	10.33	11.23 ⁽¹⁾
M_3	$AF = 4.96349C - 33.42976$	0.732	25.75	20.97	20.59 ⁽²⁾
M_4	$AF = 17.02964L - 18.88065$	0.765	15.16	11.12	11.30 ⁽²⁾
M_5	$AF = 5.35282C - 33.17061$	0.732	19.18	14.51	14.11 ⁽²⁾
M_6	$AF = 19.09951L - 24.61777$	0.765	12.71	9.43	10.54 ⁽²⁾
M_7	$AF = 0.0142C^2 + 6.1902C - 49.444$	0.733	14.08	3.62	4.07 ⁽³⁾
M_8	$AF = 14.282e^{0.0817C}$	0.749	16.04	10.77	11.32 ⁽³⁾
M_9	$AF = 6.3632C - 45.265$	0.732	14.10	12.51	12.75 ⁽³⁾
M_{10}	$AF = 140.11 \ln(C) - 335.41$	0.707	14.13	10.79	11.53 ⁽³⁾
M_{11}	$AF = 0.8569L^2 + 16.855L - 34.186$	0.769	16.60	10.74	11.75 ⁽³⁾
M_{12}	$AF = 26.813L - 61.745$	0.765	16.63	12.61	14.26 ⁽³⁾
M_{13}	$AF = 13.3e^{0.3221L}$	0.752	21.14	12.87	14.69 ⁽³⁾
M_{14}	$AF = 141.9 \ln(L) - 151.99$	0.739	16.89	13.63	14.09 ⁽³⁾

RMSE = Root mean square error; MAE = Mean absolute error; MAPE = Mean absolute percentage error; ⁽¹⁾ Present study; ⁽²⁾ Araújo *et al.* (2005); ⁽³⁾ Silva *et al.* (2015).

RQEM = Raiz quadrada do erro quadrático médio; EMA = Erro médio absoluto; EMAP = Erro médio absoluto percentual; ⁽¹⁾ Presente trabalho; ⁽²⁾ Araújo *et al.* (2005); ⁽³⁾ Silva *et al.* (2015).

Table 3 - Quality indices of the models that present two variables for estimating leaf area in the 'Palmer' mango, grown in Petrolina, Pernambuco**Tabela 3** - Índices de qualidade dos modelos que apresentam duas variáveis para a estimativa da área foliar de mangueira cv. Palmer cultivada em Petrolina, PE

Model	Formula	R ²	RMSE	MAE	MAPE
M ₁₅	$AF = 0.785 C L$	0.958	12.35	11.48	12.73 ⁽¹⁾
M ₁₆	$AF = 0.73499(C \times L) + 0.59459$	0.958	7.15	5.76	6.53 ⁽²⁾
M ₁₇	$AF = 0.76015(C \times L) + 0.43257$	0.958	9.69	8.66	9.70 ⁽²⁾
M ₁₈	$AF = 3.80 + 0.67(CL)$	0.958	5.41	3.47	3.79 ⁽³⁾
M ₁₉	$AF = -0.00019(CL)^2 + 0.72(CL) + 1.20$	0.957	5.47	3.57	3.92 ⁽³⁾
M ₂₀	$AF = 0.000001(CL)^3 - 0.00059(CL)^2 + 0.77(CL) - 0.462$	0.958	5.44	3.60	4.00 ⁽³⁾
M ₂₁	$AF = 0.904(CL)^{0.95}$	0.958	5.42	-	-
M ₂₂	$AF = -0.0001C \times L^2 + 0.6934C \times L + 4.7677$	0.958 ⁽⁴⁾	5.70	13.68	16.11 ⁽⁴⁾
M ₂₃	$AF = 0.6587C \times L + 6.9081$	0.958	5.60	4.07	4.77 ⁽⁴⁾
M ₂₄	$AF = 72.33 \ln(C \times L) - 252.32$	0.918	10.49	3.92	4.56 ⁽⁴⁾
M ₂₅	$AF = 31.813e^{0.0076C \times L}$	0.919	8.21	8.94	10.62 ⁽⁴⁾

RMSE = Root mean square error; MAE = Mean absolute error; MAPE = Mean absolute percentage error; ⁽¹⁾ Amazonas *et al.* (2008); ⁽²⁾ Araújo *et al.* (2005); ⁽³⁾ Lima *et al.* (2012); ⁽⁴⁾ Silva *et al.* (2015).

RQEM = Raiz quadrada do erro quadrático médio; EMA = Erro médio absoluto; EMAP = Erro médio absoluto percentual. ⁽¹⁾ = Amazonas *et al.* (2008); ⁽²⁾ = Araújo *et al.* (2005); ⁽³⁾ = Lima *et al.* (2012); ⁽⁴⁾ = Silva *et al.* (2015).

CONCLUSIONS

The use of mathematical models proved to be a suitable option for estimating leaf area in the 'Palmer' mango, with mean errors of less than 4%;

The models proposed for estimating leaf area in the 'Palmer' mango did not present superior results to models found in the literature;

R² as the only criterion for model quality assessment can lead to errors in deciding on the choice of model.

CONCLUSÕES

O uso de modelos matemáticos se mostrou uma adequada opção para estimar a área foliar de mangueira cv. Palmer, com erros médios abaixo de 4%;

Os modelos propostos para estimar a área foliar de mangueira cv. Palmer não apresentaram resultados superiores aos existentes na literatura;

O R² como único critério de avaliação de qualidade de modelos pode conduzir a erros na tomada de decisão quanto a escolha do modelo.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMAZONAS, I. B.; SOARES, W. A.; ALMEIDA, C. A. B.; UCHIKAWA, R. Modelagem da estimativa da área foliar da mangueira (*Mangifera indica* L.). 8º Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 20-22 de Novembro de 2008.
- ARAÚJO, E. C. E.; SANTOS, E. P. D.; PRADO, C. H. B. D. A. Estimativa da área foliar da mangueira (*Mangifera indica* L.) cvs. Tommy Atkins e 'Haden', utilizando dimensões lineares. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 27, p. 308-309, 2005.
- CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1247–1250, 2014.
- GHOREISHI, M.; HOSSINI, Y.; MAFTOON, M. Simple models for predicting leaf area of mango (*Mangifera indica* L.). **Journal of Biology and Earth Sciences**, v. 2, n. 2, p. 45-53, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. 2017. Disponível em: <http://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 05 maio 2019.
- LI, J.; HEAP, A. D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. **Ecological Informatics**, v. 6, n. 3–4, p. 228-241, 2011.
- LIMA, R. T. D.; SOUZA, P. J. D. O. P. D.; RODRIGUES, J. C.; LIMA, M. J. A. D. Modelos para estimativa da área foliar da mangueira utilizando medidas lineares. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, p. 974-980, 2012.
- MYTTENAERE, A.; GOLDEN, B.; LE GRAND, B.; ROSSI, F. Mean Absolute Percentage Error for regression models. **Neurocomputing**, v. 192, p. 38-48, 2016.
- PIMENTEL-GOMEZ, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.
- RYMBAI, H.; LAXMAN, R. H.; DINESH, M. R.; SUNOJ, V. S. J.; RAVISHANKAR, K. V.; JHA, A. K. Diversity in leaf morphology and physiological characteristics among mango (*Mangifera indica*) cultivars popular in different agro-climatic regions of India. **Scientia Horticulturae**, v. 176, p. 189-193, 2014.
- SCHMILDT, E. R.; AMARAL, J. A. T. D.; SANTOS, J. S.; SCHMILDT, O. Allometric model for estimating leaf area in clonal varieties of coffee (*Coffea canephora*). **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, p. 740-748, 2015.
- SILVA, S. F. D.; CABANEZ, P. A.; MENDONÇA, R. F. D.; PEREIRA, L. R.; AMARAL, J. A. T. D. Modelos alométricos para estimativa da área foliar de mangueira pelo método não destrutivo. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 9, n. 1, p. 86-90, 2015.