



## Modelos alométricos para estimar a área do limbo foliar de teca

Cátia Cardoso da SILVA<sup>1\*</sup>, Adilson Pacheco de SOUZA<sup>1,2</sup>, Luana BOUVIÉ<sup>2</sup>,  
Brena Geliane FERNEDA<sup>3</sup>, Adelson LEITE NETO<sup>4</sup>, Emanneli Borges MONTEIRO<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, MT, Brasil. (ORCID: \*)

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.  
(ORCID: 0000-0003-4076-1093; 0000-0003-1884-9347)

<sup>3</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. (ORCID: 0000-0001-8928-211X)

<sup>4</sup>Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, MT, Brasil. (ORCID: 0000-0002-1071-8767)

<sup>5</sup>Universidade de Cuiabá, Sinop, MT, Brasil. (ORCID: 0000-0003-2925-2757)

\*E-mail: [catiasilvaflorestal@gmail.com](mailto:catiasilvaflorestal@gmail.com) (ORCID: 0000-0002-1079-8728)

Recebido em 19/02/2019; Aceito em 11/12/2019; Publicado em 04/02/2020.

**RESUMO:** Objetivou-se neste trabalho gerar e validar 16 modelos simplificados para estimar a área do limbo foliar de árvores de *Tectona grandis* L. Foram coletadas folhas de árvores adultas em plantios homogêneos e em matrizes isoladas, nos estratos superior, médio e basal das copas, totalizando 1800 folhas. A área foliar real foi determinada usando o integrador de área foliar “Area Meter” (LI-3100C). Nos modelos de estimativa, considerou-se a área foliar como variável dependente, massa seca (MS) e as dimensões lineares da folha (comprimento – C e largura do meio da folha - L) como variáveis independentes. Para calibração e validação estatística, utilizou-se 70% e 30% das folhas, nesta ordem. Na avaliação do desempenho estatístico (validação) empregou-se o erro médio (MBE), raiz quadrática do erro médio (RMSE) e índice de ajustamento de Wilmott (dw). Empregou-se o método dos valores ponderados dos indicativos estatísticos (Vp) para definir qual a melhor modelo. Os modelos que empregam medidas conjuntas de C e L proporcionam melhores estimativas da área do limbo foliar de *T. grandis*, sendo indicado o modelo  $AF = 0,5776 C * L$ , que apresenta superestimativa de 13,98 cm<sup>2</sup>, espalhamento de 61,99 cm<sup>2</sup> e ajustamento de 0,99. Considerando a massa seca, recomenda-se o modelo  $AF = 91,9164 MS$ .

**Palavras-chave:** *Tectona grandis* L.; indicativos estatísticos; morfometria foliar.

### Allometric equations for leaf blade area estimation of teak

**ABSTRACT:** The objective of this work was to generate and validate 16 simplified models to estimate the leaf limb area of *Tectona grandis* L. trees. Leaves of adult trees were collected at homogeneous plantations and isolated matrices, in the upper, middle and basal strata of the crowns totalizing 1800 sheets. The actual leaf area was determined using the “Area Meter” leaf area integrator (LI-3100C). In the estimation models, the leaf area was considered as a dependent variable, dry mass and leaf linear dimensions (length - C and width of the middle leaf - L) as independent variables. For calibration and statistical validation, 70% and 30% of the leaves were used in this order. In the statistical performance evaluation (validation) we used the mean error (MBE), quadratic root mean error (RMSE) and Wilmott adjustment index (dw). We used the method of weighted values of statistical codes (Vp) to define the best model. Models employing C and L joint measurements provide better estimates of *T. grandis* leaf limb area, with the  $AF = 0.5776 C * L$  model being overestimated 13.98 cm<sup>2</sup>, scattering 61.99. cm<sup>2</sup> and adjustment of 0.99. Considering the dry mass, the model  $AF = 91.9164 MS$  is recommended.

**Keywords:** *Tectona grandis* L.; statistics indicatives; leaf morphometry.

## 1. INTRODUÇÃO

*Tectona grandis* L.f. é originária do sudeste asiático, e está entre as principais espécies plantadas nos países tropicais por ser arbórea de grande porte, de rápido crescimento e possuir a madeira considerada nobre para a indústria moveleira de luxo e construções. No Brasil os plantios de teca estão concentrados nos estados de Mato Grosso, Pará e Rondônia (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF, 2012), com o crescimento anual estimado de 1,0%, a área plantada foi estimada em 87.000 ha em 2016 (Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ, 2017). Os interesses nos plantios comerciais de teca no Brasil vêm aumentando, visto que a

espécie se destaca pelo rápido crescimento, alto valor econômico e resistência a pragas e doenças. É uma espécie caducifólia, (VERHAEGEN et al., 2010) e vêm sendo cultivada principalmente em plantios homogêneos, porém com resultados promissores em sistemas silvopastoris.

A folha é o órgão responsável diretamente pelo crescimento vegetal. Em geral, a área da folha é importante para aplicações em avaliações de taxas de crescimento e desenvolvimento das plantas em suas interações com o sistema solo-atmosfera (BLANCO; FOLEGATTI, 2005; TONDJO et al., 2015). Na fisiologia vegetal, a área foliar é utilizada para definir a produção primária das plantas,

enquanto que na ecologia, as relações de área foliar podem ser utilizadas para explicar a competição intra e inter-específica das espécies (PANDEY; SING, 2011).

Na determinação da área foliar podem ser empregados métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos são destrutivos e requerem uso de equipamentos com custos elevados, tais como scanners ou planímetros (LUCENA et al., 2011; ZEIST et al., 2014). Já os métodos indiretos, são considerados como não destrutivos, apresentam facilidades de uso, baixo custo e podem fornecer estimativas precisas durante o ciclo da planta, pois reduzem a variabilidade associada a procedimentos de amostragem, visto que utilizam apenas medidas de fácil obtenção na planta, tais como comprimento e largura (SOUZA et al., 2014; BOSCO et al., 2012).

A estimativa da área foliar baseada em medidas lineares do limbo foliar (comprimento e largura) pode ser feita realizada por meio de modelos estatísticos, que se constituem em alternativas usuais e não destrutivas (BOSCO et al., 2012). Reporta-se na literatura a utilização de modelos ajustados para a estimativa da área do limbo foliar de espécies agrícolas tais como batata (BUSATO et al., 2010), maçã (BOSCO et al., 2012), videira (DÖRING et al., 2014; BUTTARO et al., 2015), girassol (MALDANER et al., 2009), figueira (SOUZA et al., 2014) e espécies florestais: coníferas (JONES et al., 2015), teca (LEROY et al., 2007; TONDJO et al., 2015), braúna e craibeira (QUEIROZ et al., 2013). Para espécies florestais tropicais, podem ser destacados os trabalhos de Cabanez et al. (2014), Monteiro et al. (2014) e Monteiro et al. (2017).

Para que os modelos simplificados estimem precisamente a área foliar, é necessário considerar a variabilidade das folhas de cada espécie estudada. Conforme Bosco et al. (2012), nas espécies caducifólias podem existir diferenças no número e na morfologia das folhas, relacionadas com às variações edafoclimáticas e ao espaçamento entre plantas. Miranda (2013), relata variação no comprimento e na morfologia entre folhas jovens e maduras de teca provenientes tanto de plantios clonais quanto seminais, e recomenda que seja considerada a relação entre as características da folha e sua posição na copa para possíveis estimativas da área foliar.

Neste contexto, objetivou-se gerar e validar modelos alométricos para estimar a área do limbo foliar de *Tectona grandis*, em função da posição das folhas na copa, de árvores em: (1) plantios homogêneos e (2) plantas isoladas.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

As coletas das folhas de matrizes adultas de *T. grandis*, ocorreram no início da estação seca de 2016 (maio a junho) na região de Sinop-MT (Transição Cerrado-Amazônia). O tipo climático da região segundo a classificação de Köppen é Aw, caracterizado como tropical quente e úmido, com duas estações bem definidas: chuvosa (outubro a abril), seca (maio a setembro), com temperaturas médias mensais entre 24 e 27 °C e precipitação média anual acumulada aproximada de 1.970 mm (SOUZA et al., 2013).

Foram selecionadas aleatoriamente três matrizes adultas plantadas em espaçamento 3 x 3m e três árvores isoladas (com espaçamento superior a 15 m de distância entre si), todas em bom estado fitossanitário. Foram selecionadas 300 folhas não danificadas de cada matriz, sendo 100 folhas por

estrato (superior, médio e basal) das copas, totalizando 1800 folhas.

Obteve-se as dimensões lineares (comprimento – C e largura - L) e área do limbo de cada folha (AF), determinada em medidor fotoelétrico LI-COR, Modelo LI-3000. A massa seca (MS) das folhas (g), foi obtida pela pesagem em balança de precisão (0,001 g), após secagem em estufa de circulação forçada à 65 ± 5 °C até a obtenção da massa constante. A avaliação de MS foi realizada com 30% das folhas por estrato de cada matriz.

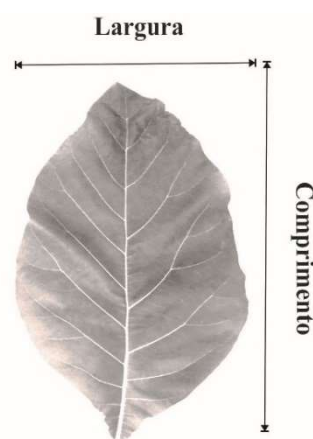


Figura 1. Comprimento e largura de uma folha de *T. grandis* L. f.  
 Figure 2. Length and width of a leaf of *T. grandis* L. f.

Com base nas variáveis C, L e MS foram avaliados 16 modelos matemáticos que descrevem comportamentos linear, potencial e polinomial (Tabela 1) propostos por SOUZA et al. (2014).

Tabela 1. Modelos matemáticos para estimar a área do limbo da folha de *T. grandis* com base no comprimento (C), largura (L) e massa seca das folhas (MS).

Table 1. Mathematical models for the estimation of *T. grandis* leaf blade area based on length (L), width (W) and leaf dry mass (DM).

Modelo alométrico			
AF <sub>1</sub>	AF= a <sub>1</sub> C	AF <sub>7</sub>	AF= a <sub>1</sub> (C L)
AF <sub>2</sub>	AF= (a <sub>1</sub> C) + a <sub>2</sub> C <sup>2</sup>	AF <sub>8</sub>	AF= (a <sub>1</sub> C L) + a <sub>2</sub> (C L) <sup>2</sup>
AF <sub>3</sub>	AF= a <sub>1</sub> C <sup>b</sup>	AF <sub>9</sub>	AF= a <sub>1</sub> (C + L)
AF <sub>4</sub>	AF= a <sub>1</sub> L	AF <sub>10</sub>	AF= [a <sub>1</sub> (C + L)] + a <sub>2</sub> (C + L) <sup>2</sup>
AF <sub>5</sub>	AF= (a <sub>1</sub> L) + a <sub>2</sub> L <sup>2</sup>	AF <sub>11</sub>	AF= a <sub>1</sub> (C L) <sup>b</sup>
AF <sub>6</sub>	AF= a <sub>1</sub> (L <sup>b</sup> )	AF <sub>12</sub>	AF= a <sub>1</sub> (C + L) <sup>b</sup>
Massa seca			
AF <sub>13</sub>	AF = a <sub>1</sub> MS		
AF <sub>14</sub>	AF = a <sub>1</sub> MS <sup>b</sup>		
AF <sub>15</sub>	AF = a <sub>1</sub> MS + a <sub>2</sub> MS <sup>2</sup>		
AF <sub>16</sub>	AF= (a <sub>1</sub> MS) + a <sub>2</sub>		

Considerou-se a AF como variável dependente e as dimensões lineares e MS, e suas respectivas interações como variáveis independentes. Empregou-se a ferramenta de otimização Solver do Microsoft Excel, com objetivo de maximização do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>). Para a geração e validação dos modelos foram utilizadas 70 e 30% das folhas, respectivamente. Realizou-se o teste F entre os valores de AF observados para verificar a homogeneidade dos dados. Para avaliação do desempenho estatístico dos modelos gerados foram empregados os seguintes indicativos: MBE (means bias error – erro médio, Equação 1); RMSE (root

mean square error – raiz quadrada do quadrado médio do erro, Equação 2); e o dw (índice de ajustamento de Willmott, Equação 3).

$$MBE = \sum_{i=1}^n (Ei - Oi) / n \quad (\text{Eq. 1})$$

$$RMSE = [\sum_{i=1}^n (Ei - Oi)^2 / n]^{0,5} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$dw = 1 - (\sum_{i=1}^n (Ei - Oi)^2 / [\sum_{i=1}^n (|Ei - \bar{O}|) + (Oi - \bar{O})^2]) \quad (\text{Eq. 3})$$

em que: Ei: valores estimados; Oi: valores observados; n: número de observações;  $\bar{E}$ : média dos valores estimados e;  $\bar{O}$ : média dos valores observados.

Com o objetivo de analisar com maior restrição o desempenho dos modelos gerados, empregou-se o método dos valores ponderados dos indicativos estatísticos (Vp), o qual permite classificar e definir o melhor modelo para estimar a área do limbo da folha (MONTEIRO et al., 2017). Na obtenção de Vp, atribuiu-se pesos de 1 a “n” para cada indicador estatístico em cada modelo, onde “n” corresponde ao número de modelos testados. Ao final, foi considerado como o melhor modelo, aquele que apresentou o menor Vp acumulado.

**3. RESULTADOS**

A frequência do comprimento, da largura (meio da folha) e da área do limbo foliar (real) de teca são apresentados nas Figuras 2 e 3. Nas árvores isoladas, em média, o comprimento (40,89 cm), a largura (24,24 cm) e a área do limbo foliar (624,06 cm²) foram maiores no estrato basal da copa (Figura

2). Para as árvores em plantio homogêneo os valores médios de C, L e área foliar são semelhantes nos estratos médios e basal (Figura 3). As folhas de árvores isoladas apresentaram as dimensões lineares superiores as folhas de matrizes cultivadas em plantio homogêneo (Figura 3).

Os dezesseis modelos de estimativa de AF foram gerados (a1; a2; b) e validados (índices estatísticos: MBE; RMSE e dw) com base no comprimento, largura e massa seca das folhas (Tabelas 2 e 3). O indicativo MBE (erro médio) representa o desvio médio entre os valores estimados e medidos, e fornece indicação do modelo matemático em superestimar ou subestimar os valores. Quanto mais próximo de zero o valor de MBE melhor o modelo, pois a superestimativa ou a subestimativa é menor (BADESCU, 2013). Nesse contexto, todos os 12 modelos validados com base nas medidas lineares do estrato superior e basal da copa de matrizes isoladas, subestimaram a área foliar em até -184,54 cm² (Tabela 2). Os modelos com base na massa seca da folha (MS) apresentaram superestimativa dos valores, exceto os modelos ajustados para o meio do dossel, que subestimaram os valores de AF entre -180,98 e -231,61 cm².

Os modelos que empregaram apenas uma variável independente (C ou L) apresentaram os menores valores de R² (< 0,7) e maiores valores de sub ou superestimativas. Os modelos potenciais e multiplicativos apresentaram R² maiores, menores valores de MBE e de Vp em relação aos modelos aditivos (Tabela 2). O desvio real entre os valores medidos e estimados é fornecido pela RMSE (raiz quadrada do quadrado médio do erro), que também indica o nível de espalhamento, a confiabilidade e repetibilidade do modelo. Quanto menor o valor absoluto de RMSE melhor o modelo (BADESCU, 2013).

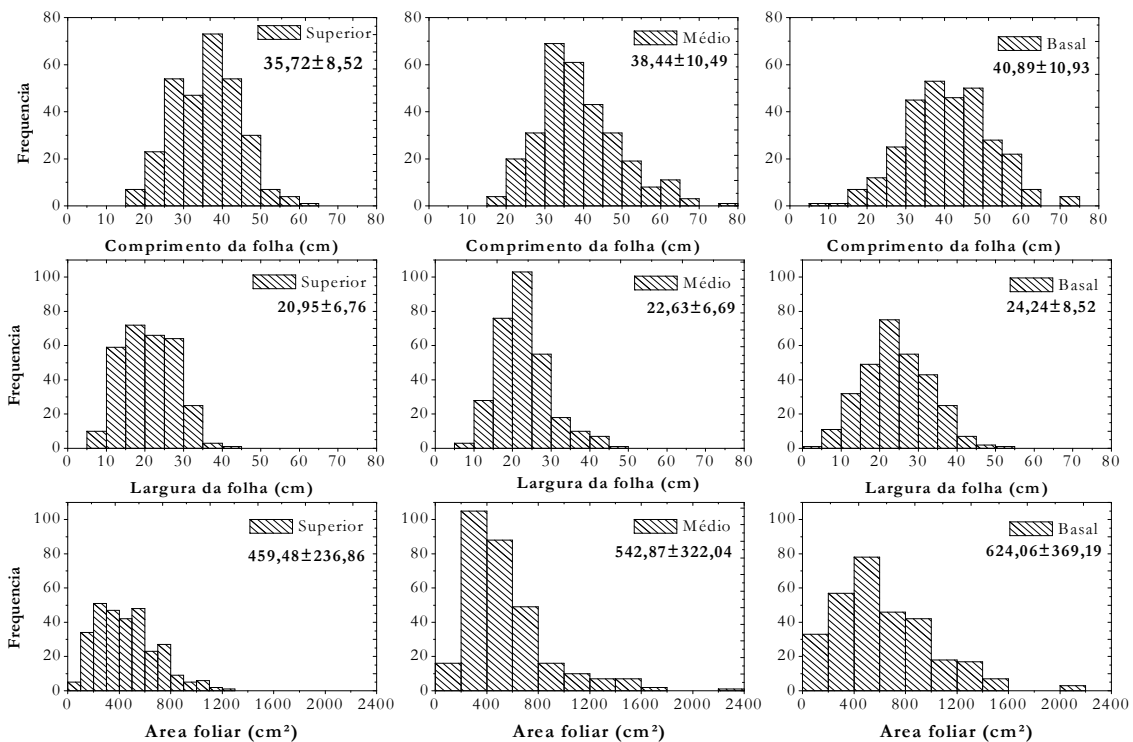


Figura 3. Histogramas de distribuição das dimensões lineares (comprimento e largura) e área foliar de folhas em diferentes estratos das copas em matrizes isoladas de *T. grandis* L.

Figure 2. Histograms for distribution of linear dimensions (length and width) and leaf area in different strata of the crowns in matrices isolated from *T. grandis* L.

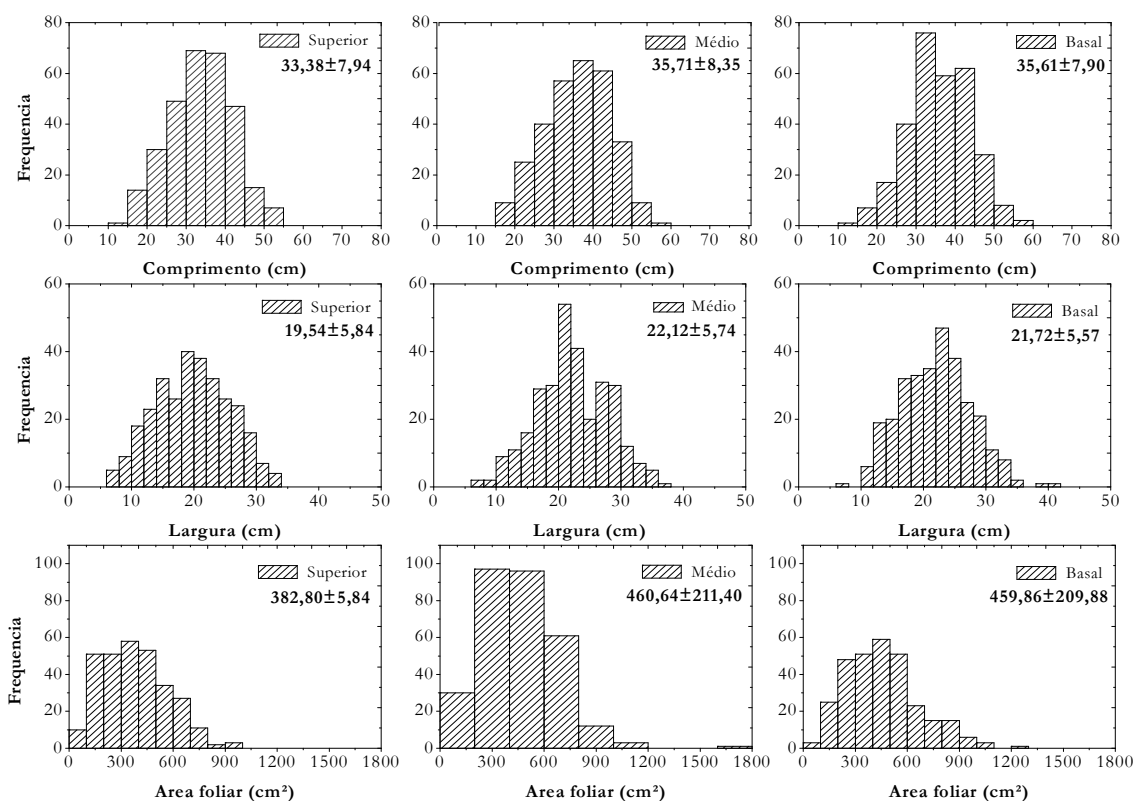


Figura 4. Histogramas de distribuição das dimensões lineares (comprimento e largura) e área foliar de folhas em diferentes estratos das copas em matrizes de *T. grandis* L. de plantio homogêneo.

Figure 3. Histograms for distribution of linear dimensions (length and width) and leaf area in different strata of the crowns in *T. grandis* L. matrices of homogeneous planting.

Os modelos que apresentaram menores espalhamentos, empregavam medidas de C e L. Os menores valores de RMSE foram obtidos na estimativa de folhas posicionadas no estrato superior da copa (de 55,40 a 151,55 cm<sup>2</sup>) e os maiores valores foram observados nos modelos gerados com base nas dimensões lineares (C e L) do estrato basal das copas (de 63,79 a 340,32 cm<sup>2</sup>) (Tabela 2). O índice de concordância de Willmott “d” é um indicativo do grau em que as previsões dos modelos são livres de erro. Os valores de “d” podem variar de 0,0 (ausência de concordância) a 1,0 (concordância perfeita entre os valores observados e estimados) (WILLMOTT, 1981). Os valores de “d” obtidos a partir dos modelos gerados variaram de 0,5493 a 0,9950.

Com base nesses parâmetros e no somatório dos valores ponderados (Vp), os melhores modelos para a estimativa de AF nos estratos superior, médio e basal da copa foram AF<sub>8</sub>, AF<sub>7</sub> e AF<sub>7</sub>, respectivamente. O modelo 1 (AF = a<sub>1</sub> C) apresentou o pior desempenho de estimativa da área foliar nos três estratos da copa (ΣVp = 36).

Por estar relacionada com a massa da folha, a área foliar pode ser estimada através dos valores de massa seca, entretanto, deve-se destacar que mesmo que os modelos baseados em MS produzam bons resultados, a sua aplicação é dependente de análises destrutivas, e ainda, demanda uma estrutura mínima para sua obtenção (estufa de secagem e balança), que constituem-se em limitações do método.

Os modelos com base na MS da folha, com menor somatório de Vp (4, 4 e 5) para os estratos superior (AF<sub>13</sub>=83,2648 MS), médio (AF<sub>15</sub>=124,1525 MS - 2,7555 MS<sup>2</sup>) e basal (AF<sub>13</sub>=104,9675 MS e AF<sub>16</sub>=94,8351 MS +

97,52755), podem ser recomendadas para a estimativa de AF árvores de teca plantadas em maiores espaçamentos.

Os modelos de estimativas de área foliar para o meio e a base da copa, de árvores em plantio homogêneo, apresentaram tendência de subestimativa com valores variando de -5,01 a -131,43 cm<sup>2</sup>. Para o estrato superior da copa houve superestimativa em até 92,21 cm<sup>2</sup> (Tabela 3). Considerando os três estratos da copa o melhor modelo de estimativa de é o AF<sub>7</sub>.

Para as árvores de *T. grandis* isoladas, o modelo AF<sub>1</sub> apresentou o maior Vp acumulado para o ápice e base, indicando que para obtenção de área do limbo de folhas de teca devem ser realizadas medidas conjuntas de C e L. Para estimativas de AF baseadas em MS em plantios homogêneos, os modelos AF<sub>15</sub>, AF<sub>15</sub> e AF<sub>13</sub>, para ápice, meio e base, respectivamente, apresentaram melhor desempenho.

Em geral, os modelos 7 (AF= a<sub>1</sub>\*C\*L) e 13 (AF= a<sub>1</sub>\*MS), apresentaram os melhores desempenhos estatísticos, independentemente da condição de espaçamento de plantio e da posição das folhas na copa (Tabelas 2 e 3). Esses modelos apresentaram menores valores acumulados (Σ Vp) devido aos menores espalhamentos, menores subestimativas ou superestimativas e maiores índices de concordância (acima de 0,71) e valores de R<sup>2</sup> superiores a 0,80. Então para facilitar as aplicações práticas, foram gerados novos modelos baseados na estrutura de AF<sub>7</sub> e AF<sub>13</sub> (AF= a<sub>1</sub>\*X), englobando todas as posições do dossel e as condições de espaçamento (Figura 4).

O modelo que considera a MS como variável independente (AF= 91,9164 \*MS) apresentou bom desempenho (Figura 4A), com valores de R<sup>2</sup> = 0,7821,

superestimativa de 22,86 cm, espalhamento de 142,65 cm<sup>2</sup> e 0,92 de concordância entre os valores observados e estimados (dw). O modelo AF= 0,5776 \*C\*L (Figura 4B) apresentou melhor desempenho que o modelo que considera apenas a

massa seca da folha como variável independente. Pois, apresentou maior R<sup>2</sup>=0,9457, menores superestimativa (13,98 cm) e espalhamento (61,99 cm<sup>2</sup>) e maior índice de concordância (dw = 0,99).

Tabela 2. Coeficientes ajustados (a<sub>1</sub> e b), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e índices estatísticos (MBE, RMSE e dw) para modelos de estimativa de área foliar baseados em medidas lineares ou massa seca, em diferentes posições da copa de matrizes isoladas de teca.

Table 2. Adjusted coefficients (a<sub>1</sub> and b), coefficient of determination (R<sup>2</sup>) and statistical indices (MBE, RMSE and dw) for models of leaf area estimation based on linear measures or dry mass, in different positions of the crown of isolated teak matrices.

Modelos	Coeficientes ajustados			R <sup>2</sup>	Validação estatística							
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b		MBE	V <sub>p</sub>	RMSE	V <sub>p</sub>	dw	V <sub>p</sub>	∑ V <sub>p</sub>	
Estrato superior da copa	AF <sub>1</sub>	12,2979	-	-	0,5673	-128,34	12	151,55	12	0,5493	12	36
	AF <sub>2</sub>	-1,1156	0,3600	-	0,8147	-45,58	8	115,83	9	0,7242	9	26
	AF <sub>3</sub>	0,2373	-	2,0903	0,8148	-46,73	9	116,30	10	0,7232	10	29
	AF <sub>4</sub>	21,6890	-	-	0,7312	-74,40	10	93,82	8	0,7291	8	26
	AF <sub>5</sub>	10,7680	0,4655	-	0,8243	-34,61	7	65,32	7	0,8888	7	21
	AF <sub>6</sub>	4,5122	-	1,5021	0,8310	-27,98	6	62,16	4	0,8971	6	16
	AF <sub>7</sub>	0,5749	-	-	0,9314	-4,27	2	56,63	3	0,9252	3	8
	AF <sub>8</sub>	0,5993	-2,1E-05	-	0,9329	-3,41	1	55,12	1	0,9263	1	3
	AF <sub>9</sub>	7,9325	-	-	0,6619	-103,03	11	121,79	11	0,6276	11	33
	AF <sub>10</sub>	-0,2779	0,1380	-	0,9247	-11,81	4	64,79	6	0,9001	4	14
	AF <sub>11</sub>	0,7003	-	0,9716	0,9322	-5,90	3	55,40	2	0,9262	2	7
	AF <sub>12</sub>	0,1213	-	2,0231	0,9246	-12,71	5	64,65	5	0,9001	5	15
	Massa seca											
	AF <sub>13</sub>	83,2648	-	-	0,6633	-23,44	2	96,42	1	0,9748	1	4
	AF <sub>14</sub>	177,4992	-	0,6562	0,8298	23,93	3	107,21	3	0,9612	3	9
	AF <sub>15</sub>	123,1751	-3,8263	-	0,8872	26,88	4	103,43	2	0,9676	2	8
AF <sub>16</sub>	64,4557	154,5720	-	0,7608	17,86	1	110,28	4	0,9582	4	9	
Estrato médio da copa	AF <sub>1</sub>	13,8637	-	-	0,5652	-74,59	12	261,39	12	0,7781	12	36
	AF <sub>2</sub>	1,0220	0,3164	-	0,7317	1,82	1	134,82	8	0,9678	8	17
	AF <sub>3</sub>	0,3846	-	1,9676	0,7309	3,51	2	134,93	9	0,9683	7	18
	AF <sub>4</sub>	23,9902	-	-	0,6727	-48,46	10	245,61	10	0,8063	10	30
	AF <sub>5</sub>	8,1980	0,6458	-	0,7986	6,46	4	123,67	6	0,9700	6	16
	AF <sub>6</sub>	2,9676	-	1,6562	0,7996	4,77	3	128,07	7	0,9669	9	19
	AF <sub>7</sub>	0,5958	-	-	0,8777	35,29	7	85,03	1	0,9882	1	9
	AF <sub>8</sub>	0,5872	0,5872	-	0,8779	37,22	9	86,65	3	0,9881	3	15
	AF <sub>9</sub>	8,8577	-	-	0,6375	-60,10	11	249,90	11	0,7968	11	33
	AF <sub>10</sub>	-0,2167	0,1412	-	0,8588	31,28	5	90,06	4	0,9868	4	13
	AF <sub>11</sub>	0,5928	-	1,0007	0,8777	35,38	8	85,09	2	0,9882	2	12
	AF <sub>12</sub>	0,1133	-	2,0467	0,8591	33,19	6	91,21	5	0,9867	5	16
	Massa seca											
	AF <sub>13</sub>	108,3499	-	-	0,8172	-227,28	3	312,73	2	0,7151	1	6
	AF <sub>14</sub>	144,4779	-	0,8282	0,7761	-217,49	2	328,12	3	0,6496	4	9
	AF <sub>15</sub>	124,1525	-2,7555	-	0,7089	-180,98	1	304,14	1	0,6736	2	4
AF <sub>16</sub>	92,0698	81,3885	-	0,8087	-231,61	4	332,00	4	0,6574	3	11	
Estrato basal da copa	AF <sub>1</sub>	14,8062	-	-	0,5536	-184,54	12	340,32	12	0,7563	12	36
	AF <sub>2</sub>	-1,3063	0,3728	-	0,7815	-31,61	9	144,55	9	0,9715	9	27
	AF <sub>3</sub>	0,2407	-	2,0930	0,7818	-30,12	7	144,50	8	0,9715	8	23
	AF <sub>4</sub>	25,3175	-	-	0,7432	-94,66	10	213,30	10	0,9183	10	30
	AF <sub>5</sub>	7,7937	0,6452	-	0,9076	-28,42	6	87,13	6	0,9903	7	19
	AF <sub>6</sub>	2,5165	-	1,7015	0,9068	-31,17	8	87,44	7	0,9904	6	21
	AF <sub>7</sub>	0,5776	-	-	0,9256	-10,39	4	64,04	2	0,9949	2	8
	AF <sub>8</sub>	0,5768	0,5768	-	0,9256	-11,11	5	64,22	3	0,9949	3	11
	AF <sub>9</sub>	9,4007	-	-	0,6495	-103,05	11	256,06	11	0,8666	11	33
	AF <sub>10</sub>	-0,6089	0,1436	-	0,9089	-10,31	3	74,86	5	0,9930	4	12
	AF <sub>11</sub>	0,5639	-	1,0033	0,9256	-9,98	2	63,79	1	0,9950	1	4
	AF <sub>12</sub>	0,1027	-	2,0638	0,9089	-9,42	1	74,83	4	0,9930	5	10
	Massa seca											
	AF <sub>13</sub>	104,9675	-	-	0,8775	12,75	3	165,48	1	0,9431	1	5
	AF <sub>14</sub>	160,2573	-	0,8214	0,8981	118,25	4	323,25	4	0,6587	4	12
	AF <sub>15</sub>	126,9105	-1,8563	-	0,8939	10,38	2	257,49	3	0,7972	3	8
AF <sub>16</sub>	94,8351	97,5275	-	0,8931	0,1319	1	196,44	2	0,9011	2	5	

Modelos alométricos para estimar a área do limbo foliar de teca

Tabela 3. Coeficientes ajustados ( $a_1$  e  $b$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e índices estatísticos (MBE, RQME e  $dw$ ) para modelos de estimativa de área foliar com base em medidas lineares ou massa seca das matrizes de plantio homogêneo da teca.

Table 3. Adjusted coefficients ( $a_1$  and  $b$ ), coefficient of determination ( $R^2$ ) and statistical indices (MBE, RMSE and  $dw$ ) for models of leaf area estimation based on linear measures or dry mass, in different positions of the crown of teak in homogeneous planting.

Modelos	Coeficientes ajustados			$R^2$	Validação estatística								
	$a_1$	$a_2$	$b$		MBE	$V_p$	RMSE	$V_p$	$dw$	$V_p$	$\sum V_p$		
Estrato superior da copa	AF <sub>1</sub>	10,9314	-	-	0,5706	92,21	12	149,65	12	0,6904	12	36	
	AF <sub>2</sub>	1,4550	0,2739	-	0,7003	41,26	8	93,20	8	0,9145	8	24	
	AF <sub>3</sub>	0,5633	-	1,8379	0,7016	42,82	9	92,90	9	0,9152	9	27	
	AF <sub>4</sub>	19,2583	-	-	0,7833	58,79	10	76,45	10	0,9363	10	30	
	AF <sub>5</sub>	6,6477	0,6008	-	0,8964	11,52	6	52,94	7	0,9777	6	19	
	AF <sub>6</sub>	2,8424	-	1,6309	0,8973	13,04	7	52,63	6	0,9781	7	20	
	AF <sub>7</sub>	0,5542	-	-	0,9103	3,46	1	43,30	1	0,9856	1	3	
	AF <sub>8</sub>	0,5631	-1,1E-05	-	0,9104	5,12	3	43,56	3	0,9852	3	9	
	AF <sub>9</sub>	7,0257	-	-	0,6816	76,88	11	93,72	11	0,8880	11	33	
	AF <sub>10</sub>	-0,2414	0,1325	-	0,8803	7,34	4	51,93	5	0,9782	5	14	
	AF <sub>11</sub>	0,5834	-	0,9923	0,9104	4,22	2	43,31	2	0,9853	2	6	
	AF <sub>12</sub>	0,1143	-	2,0283	0,8803	7,56	5	51,98	4	0,9782	4	13	
	Massa seca												
	AF <sub>13</sub>	81,4377	-	-	0,9152	117,45	1	165,88	3	0,8828	2	6	
	AF <sub>14</sub>	105,1311	-	0,6562	0,9297	129,51	3	164,08	2	0,8790	3	8	
	AF <sub>15</sub>	98,3320	-1,8791	-	0,9324	127,49	2	159,74	1	0,8840	1	4	
AF <sub>16</sub>	77,8305	36,8866	-	0,9259	132,22	4	169,69	4	0,8732	4	12		
Estrato médio da copa	AF <sub>1</sub>	11,9904	-	-	0,6578	-131,43	12	213,61	12	0,6998	12	36	
	AF <sub>2</sub>	4,9076	0,1892	-	0,7594	-100,89	9	173,33	8	0,8273	8	25	
	AF <sub>3</sub>	1,4479	-	1,5849	0,7581	-101,83	10	173,88	9	0,8264	9	28	
	AF <sub>4</sub>	19,8591	-	-	0,7737	-98,92	8	176,65	10	0,7862	10	28	
	AF <sub>5</sub>	7,2247	0,5540	-	0,8979	-40,36	2	109,73	2	0,9372	2	6	
	AF <sub>6</sub>	2,7378	-	1,6352	0,8974	-42,25	3	111,16	3	0,9353	3	9	
	AF <sub>7</sub>	0,5375	-	-	0,9384	-38,54	1	104,89	1	0,9473	1	3	
	AF <sub>8</sub>	0,5875	0,5875	-	0,9479	-49,94	4	114,63	5	0,9322	5	14	
	AF <sub>9</sub>	7,5129	-	-	0,7487	-116,81	11	195,94	11	0,7382	11	33	
	AF <sub>10</sub>	1,4261	0,1023	-	0,9226	-58,48	6	122,71	6	0,9205	6	18	
	AF <sub>11</sub>	1,0302	-	0,9046	0,9480	-50,20	5	113,79	4	0,9329	4	13	
	AF <sub>12</sub>	0,2797	-	1,8062	0,9231	-59,46	7	123,59	7	0,9192	7	21	
	Massa seca												
	AF <sub>13</sub>	97,1701	-	-	0,8606	76,63	2	128,29	4	0,9531	3	9	
	AF <sub>14</sub>	125,8437	-	0,8526	0,8786	84,58	3	115,58	2	0,9586	2	7	
	AF <sub>15</sub>	116,6112	-3,1351	-	0,8807	75,58	1	101,20	1	0,9669	1	3	
AF <sub>16</sub>	86,4764	57,4184	-	0,8771	90,45	4	127,73	3	0,9514	4	11		
Estrato basal da copa	AF <sub>1</sub>	12,7027	-	-	0,5570	-31,84	9	153,52	12	0,8432	12	33	
	AF <sub>2</sub>	2,6721	0,2643	-	0,6827	-41,52	11	114,34	9	0,9401	9	29	
	AF <sub>3</sub>	0,7154	-	1,7918	0,6822	-42,78	12	114,21	8	0,9405	8	28	
	AF <sub>4</sub>	21,2552	-	-	0,7207	-25,19	8	129,11	10	0,8974	10	28	
	AF <sub>5</sub>	8,4946	0,5429	-	0,8366	-10,41	2	65,37	7	0,9814	7	16	
	AF <sub>6</sub>	3,2016	-	1,6014	0,8390	-11,88	5	64,72	6	0,9819	6	17	
	AF <sub>7</sub>	0,5651	-	-	0,9139	-11,69	3	44,89	1	0,9922	1	5	
	AF <sub>8</sub>	0,5686	0,5686	-	0,9139	-11,94	6	45,19	3	0,9921	3	12	
	AF <sub>9</sub>	8,0036	-	-	0,6619	-37,36	10	144,65	11	0,8627	11	32	
	AF <sub>10</sub>	-0,2490	0,1360	-	0,8869	-17,19	7	57,32	5	0,9872	5	17	
	AF <sub>11</sub>	0,5782	-	0,9967	0,9139	-11,77	4	45,06	2	0,9921	2	8	
	AF <sub>12</sub>	0,0972	-	2,0792	0,8827	-5,01	1	54,32	4	0,9890	4	9	
	Massa seca												
	AF <sub>13</sub>	108,0507	-	-	0,9331	28,15	1	95,37	2	0,9624	1	4	
	AF <sub>14</sub>	127,8798	-	0,9018	0,9422	58,66	4	135,00	4	0,9254	4	12	
	AF <sub>15</sub>	123,2917	-2,4486	-	0,9442	36,52	2	94,45	1	0,9581	3	6	
AF <sub>16</sub>	100,8418	35,3005	-	0,9397	40,19	3	96,53	3	0,9598	2	8		

4. DISCUSSÃO

Para obtenção de modelos de estimativa de área de foliar importante ter variabilidade no tamanho das folhas, com maiores amplitudes do comprimento, da largura e da área do

limbo, aliada à elevada magnitude do coeficiente de variação. Pois permite a aplicação na estimativa de área de folhas pequenas, médias e grandes (CARGNELUTTI FILHO et al., 2012).

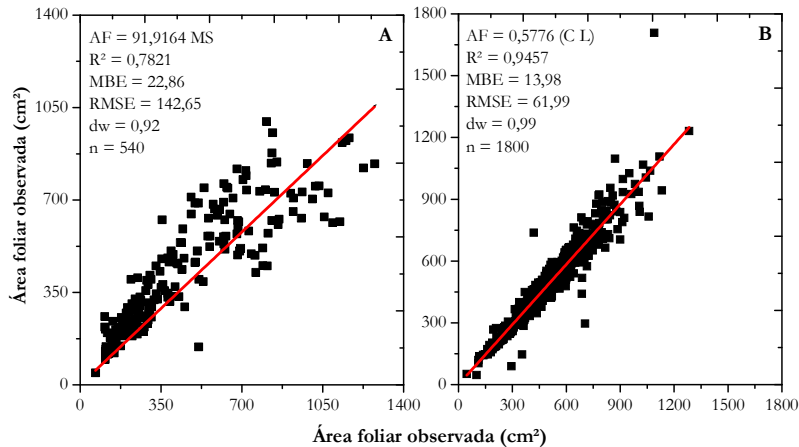


Figura 4. Modelos de estimativa da área da folha de *Tectona grandis* L. com base na massa seca da folha (A) e em dimensões lineares do limbo foliar "C e L" (B), independentemente da posição da folha na copa e da condição de cultivo da planta.

Figure 4. Models of leaf bland area of the *Tectona grandis* L. based on the dry mass of the leaf (A) and on linear dimensions of the leaf blade "C and L" (B), regardless of the leaf position in the crown and the crop condition plant.

Os maiores valores de área foliar em plantas isoladas podem ser atribuídos a maior disponibilidade de recursos de crescimento, tais como luz, água e nutrientes. Conforme Nascimento et al. (2012) as árvores cultivadas em maiores espaçamentos têm maior área da copa e maiores diâmetros, no entanto, a disposição das plantas na área disponível, influencia na captação e uso dos recursos de crescimento.

A maior área foliar no estrato basal da copa indica uma estratégia da planta à redução de luminosidade. Pois, a eficiência do uso da luz, pelo vegetal, diminui do ápice para a base, devido o potencial fotossintético das folhas que estão no estrato basal da copa ser inferior ao das folhas que estão no estrato superior recebendo maior quantidade de luz (IQBAL et al., 2012).

Na estimativa da área foliar, os modelos que consideram o comprimento e a largura das folhas são mais eficientes. Em geral, os modelos multiplicativos (C \* L) são mais precisos do que os aditivos (C + L) pois, a área foliar está correlacionado com o produto do comprimento por largura, como no caso de outras espécies florestais (LEROY et al., 2007; MONTEIRO et al., 2014; 2017), e frutíferas (SOUZA et al. 2014).

A relação C/L das folhas é constante durante o crescimento, então do biologicamente, um modelo linear é razoável para estimar a área foliar com base em parâmetros estruturais das folhas (LIU et al., 2017). Com base no desempenho estatístico pode-se recomendar para a estimativa da área do limbo foliar de teca modelos lineares que consideram as variáveis C e L ou MS, independentemente da posição na copa e do espaçamento de plantio.

## 5. CONCLUSÕES

A estimativa da área do limbo foliar da teca considerando as dimensões das folhas (C e L) deve ser obtida pelo modelo  $AF = 0,5776 * C * L$ . E, com base na massa seca das folhas a área foliar pode ser obtida pelo modelo  $AF = 91,9164 * MS$ .

Os menores erros de estimativa da área foliar são obtidos com equações alométricas que empregam o produto entre o comprimento e a largura da folha, independentemente do estrato da copa da árvore e do espaçamento de cultivo.

## 6. AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a FAPEMAT (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso – Processo: 159405/2015).

## 7. REFERÊNCIAS

- ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico 2012**. 2012. Disponível em: <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF11/ABRAF11-BR.pdf>. Acesso em: 18/12/2016.
- BADESCU, V. Assessing the performance of solar radiation computing models and model selection procedures. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Oxford, v. 105-106, p. 119-134, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2013.09.004>
- BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V. Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p. 305-309, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162005000400001>
- BOSCO, L. C.; BERGAMASCHI, H.; CARDOSO, L. C.; DE PAULA, V. A.; CASAMAL, B. Seleção de modelos de regressão para estimar a área foliar de macieiras 'Royal Gala' e 'Fuji Suprema' sob tela antigranizo em céu aberto. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 34, n. 2, p. 504-514, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452012000200024>
- BUSATO, C.; FONTES, P. C. R.; BRAUN, H.; BUSATO, C. C. M. Estimativa da área foliar da batateira, cultivar Atlantic, utilizando dimensões lineares. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 702-708, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902010000400026>
- BUTTARO, D.; ROUPHAEL, Y.; RIVEIRA, C. M.; COLLA, G.; GONNELLA, M. Simple and accurate allometric model for leaf area estimation in *Vitis vinifera* L. genotypes. **Photosynthetica**, Prague, v. 53, n. 3, p. 342-348, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11099-015-0117-2>

- CABANEZ, P. A.; SILVA, S. F. da; PEREIRA, L. R.; MONTEIRO, E. C. Estimativa da área foliar do biribazeiro através de modelos de regressão. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v. 12, n. 1, p. 51-55, 2014.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; TOEBE, M.; BURIN, C.; FICK, A. L.; CASAROTTO, G. Estimativa da área foliar de nabo forrageiro em função de dimensões foliares. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 1, p.47-51, 2012.
- DÖRING, J.; STOLL, M.; KAUER, R.; FRISCH, M.; TITMANN, S. Indirect estimation of leaf area index in VSP – trained grapevines using plant area index. **American Journal of Enology and Viticulture**, Davis, v. 64, n.1, p. 153-158, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.5344/ajev.2013.13073>
- IBÁ\_INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2017: Ano Base 2016**. 2017. Disponível em: <https://iba.org/publicacoes>. Acesso em: 19 fev. 2019.
- IQBAL, N.; MASOOD, A.; KHAN, N. A. Analyzing the significance of defoliation in growth, photosynthetic compensation and source-sink relations. **Photosynthetica**, Prague, v. 50, n. 2, p. 161-170, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s11099-012-0029-3>
- JONES, D. A.; O'HARA, K. L.; BATTLES, J. J.; GERSONDE, R. F. Leaf area prediction using three alternative sampling methods for seven Sierra Nevada conifer species. **Forests**, v. 6, p. 2631-2654, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/f6082631>
- LEROY, C.; SAINT-ANDRÉ, L.; AUCLAIR, D. Practical methods for non-destructive measurement of tree leaf area. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 71, n. 3, p. 99-108, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-007-9077-2>
- LIU, Z.; ZHU, Y, LI, F.; JIN, G. Non-destructively predicting leaf area, leaf mass and specific leaf area based on a linear mixed-effect model for broadleaf species. **Ecological Indicators**, v. 78, p. 340–350, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.025>
- LUCENA, R. R. M.; BATISTA, T. M. V.; DOMBROSKI, J. L. D.; LOPES, W. A. R.; RODRIGUES, G. S. O. Medição da área foliar de aceroleira. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 40-45, 2011.
- MALDANER, I. C.; HELDWEIN, A. B.; LOOSE, L. H.; LUCAS, D. D. P.; GUSE, F. I.; BERTOLUZZI, M. P. Modelos de determinação não-destrutiva da área foliar em girassol. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 1356-1361, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009000500008>
- MIRANDA, M. C. **Caracterização morfológica e avaliação do desenvolvimento inicial de clones de teca (*Tectona grandis* L.f.)**. 2013. 80f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.
- MONTEIRO, E. B.; SILVA, C. C.; SILVA, A. C.; SOUZA, A. P. Estimating emission of leaves seedlings forest in different shading levels, at conditions of Transition Amazon-Cerrado, Brazil. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 15, p. 2330-2341, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2014.515247>
- MONTEIRO, E. B.; SILVA, A. C.; SOUZA, A. P.; SILVA, C. C.; KAZAMA, V. S.; TANAKA, A. A. Statistical parameters to estimate the leaf area of native forest seedlings of genus *Tabebuia* and *Handroanthus*. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 33, n. 4, p. 956-967, 2017.
- NASCIMENTO, D. F.; LELES, P. S. S. OLIVEIRA NETO, S. N.; MOREIRA, R. T. S.; ALONSO, J. M. Crescimento inicial de seis espécies florestais em diferentes espaçamentos. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 159-165, 2012.
- PANDEY, S. K.; SINGH, H. A Simple, Cost-Effective Method for Leaf Area Estimation. **Journal of Botany**, London, v. 2011, p. 1-6, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2011/658240>
- QUEIROZ, J. E.; SILVA, G. H.; SOUZA NETO, A. G. Avaliação estatística da área foliar através de modelos de equações em duas espécies florestais. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 8, n. 1, p. 146-153, 2013.
- SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, Sinop, v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013.
- SOUZA, A. P.; SILVA, A. C.; LEONEL, S.; SOUZA, M. E.; TANAKA, A. A. Estimativas da área da folha de figueiras 'Roxo de Valinhos' usando dimensões lineares do limbo foliar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 7, p. 1172-1179, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20130699>
- TONDJO, K.; BRANCHERIAU, L.; SABATIER, S. A.; KOKUTSE, A. D.; AKOSSOU, A.; KOKOU, K.; FOURCAUD, T. Non-destructive measurement of leaf area and dry biomass in *Tectona grandis*. **Trees**, Santa Maria, v. 29, n. 5, p. 1625-1631, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-015-1227-y>
- VERHAEGEN, D.; FOFANA, I. J.; LOGOSSA, Z. A.; OFORI, D. What is the genetic origin of teak (*Tectona grandis* L.) introduced in Africa and in Indonesia? **Tree Genetics & Genomes**, v. 6, p. 717-733, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11295-010-0286-x>
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- ZEIST, A. R.; OLIVEIRA, J. R. F.; LIMA FILHO, R. B.; SILVA, M. L. S.; RESENDE, J. T. V. Comparação de métodos de estimativa de área foliar em morangueiro. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 20, n. 1/2, p. 33–41, 2014.