

ESTIMATIVA DA ÁREA FOLIAR DO CAFEIEIRO (*Coffea arabica* L.) POR MEIO DE DIMENSÕES LINEARES

Marcelo Francisco POMPELLI^{1,*}; Werner Camargos ANTUNES¹; Agnaldo Rodrigues de Melo CHAVES¹; Diego Martins CARRETERO; Fábio Murilo DaMATTA²

¹Estudantes de pós-graduação em Fisiologia Vegetal, Departamento de Biologia Vegetal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, 36570-000, E-mail: mpompelli@yahoo.com.br; ²Prof^o Adjunto do Depto. de Biologia Vegetal, UFV, Viçosa, MG; * Autor para correspondência, e-mail:

Resumo:

A medição da área foliar (AF) é de grande importância em estudos fisiológicos e agrônômicos. A determinação da AF por medidas lineares é uma ferramenta útil para análises não destrutivas. O objetivo deste trabalho foi definir equações para a estimativa da AF do cafeeiro, por meio de medidas lineares do limbo. A partir de 300 folhas de diferentes posições da copa e idades, mediu-se o comprimento (C) e a largura (L) do limbo. A área foliar real foi medida por meio da digitalização do limbo foliar e análise pelo programa Image-Pro Plus. Os valores estimados foram confrontados com os observados. Foi possível estimar a AF das plantas com base nas equações: $AF = 1,8691 L^{1,8300} R^2 = 0,9638$, $AF = 0,4394 C^{1,8200} R^2 = 0,9701$ e $AF = 0,8223 CL^{0,9408} R^2 = 0,9848$.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, cafeeiro, área foliar, modelo de estimação

LEAF AREA ESTIMATIVE OF THE COFFEE TREE (*Coffea arabica* L.) USING THE LINEAR DIMENSIONS

Abstract:

Leaf area (LA) measurement is of value in physiological and agronomic studies. Determination of LA by linear dimensions is particularly useful in nondestructive analysis. This study aimed, therefore, to define equations for estimating LA using linear dimensions of coffee leaf blades. Three hundred leaves from different canopy positions and different physiological ages were collected, and then their lengths (L) and widths (W) were measured. Real LA was taken from digitized images of leaf blades that were analyzed through the Image-Pro Plus software. The estimated LA values were confronted with the observed ones. As a result, it was possible to estimate LA based on the following the equations: $LA = 1.8691 W^{1.8300} R^2 = 0,9638$, $LA = 0.4394 L^{1.8200} R^2 = 0,9701$ and $LA = 0.8223 WL^{0.9408} R^2 = 0,9848$.

Key-words: *Coffea arabica*, coffee, leaf area, estimating model

Introdução

A área foliar é uma variável importante para fins agrônômicos e fisiológicos, em estudos que envolvem análise de crescimento vegetal, interceptação de luz solar, eficiência fotossintética, evapotranspiração, propagação vegetativa, ataque de pragas e doenças, assim como respostas fisiológicas a fatores como condução de plantas, podas, porta-enxertos, irrigação e fertilização.

Os métodos para a obtenção da área foliar podem ser destrutivos ou não. Dentre os destrutivos, citam-se: método planimétrico, método gravimétrico, utilização do peso seco da folha e sua relação com a área foliar, dentre outros. 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, planimetria fotográfica fotoelétrica, planimetria com radiação, fotografia hemisférica e outros (Marshall, 1968).

A determinação da área foliar, em geral, é realizada por métodos diretos, em que as folhas são coletadas e medidas por meio dos equipamentos de medição automática, tais como Licor 3100 (Licor Inc., Lincoln, Nebraska, EUA; entretanto, esses são métodos destrutivos e restrito quanto à disponibilidade dos aparelhos. Métodos indiretos são úteis quando esses equipamentos não estão disponíveis ou quando medições não destrutivas são requeridas, tais como as que ocorrem no campo, nas quais se pretende avaliar as mudanças que ocorrem com uma determinada folha (e.g. padrão de crescimento da folha, acompanhamento de alterações na área foliar num determinado estágio fisiológico).

Um dos métodos mais usados é a estimação da área foliar por meio de equações matemáticas envolvendo a medição do comprimento do limbo foliar, a maior largura da folha, ou ambos. Tais artifícios foram anteriormente utilizados na determinação da área foliar de *Coffea arabica* (Tavares-Júnior *et al.*, 2002; Barros *et al.*, 1973), *Annona squamosa* (Silva *et al.*, 2004), *Mangifera indica* L. (Araújo *et al.*, 2005), *Cocos nucifera* L. (Souza *et al.*, 2005), *Carica papaya* (Campostrini & Yamanishi, 2001), fruteiras silvestres (Mielke *et al.*, 1995) e em uma diversidade de outras plantas herbáceas ou arbustivas.

Barros *et al.* (1973) desenvolveram um método para determinação da área foliar por meio de medidas lineares de comprimento e largura máxima do limbo foliar via regressões lineares e não lineares estabeleceram uma equação do tipo $y = ax$, em que x é o produto do comprimento pela largura. Embora aplicável, esse método é sabidamente trabalhoso, uma

vez que resulta numa quantidade de dados considerável, fato que pode levar a erros de manipulação, e impreciso, levando a uma subestimação da área foliar (Tavares-Júnior *et al.*, 2002)

Uma abreviação ao método de Barros *et al.* (1973) dar-se-ia pela tomada de apenas uma medida, ou comprimento ou largura do limbo fato que diminuiria o tempo despendido na coleta e digitação dos dados. Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo estabelecer um modelo matemático baseado na medida linear do comprimento do limbo foliar, sua maior largura, ou ainda ambas as medidas

Material e Métodos

Trezentas folhas foram coletadas de plantas de *Coffea arabica* L. plantadas a pleno sol no campus da Universidade Federal de Viçosa, MG (20°45'S, 42°52'W). Procurou-se coletar, ao acaso, folhas de pelo menos 10 diferentes plantas, nas mais diversas posições da copa, evitando-se as que apresentavam má formação intrínseca ou deformações oriundas de fatores externos visíveis, como pragas e molésticas.

Logo após a coleta das folhas precedeu-se a medição linear do comprimento sobre o limbo central, a maior largura, perpendicular ao maior eixo da folha, utilizando-se de uma régua. Em seguida, as folhas foram digitalizadas de forma monocromática com a utilização de um scanner de mesa (Genius 1200x1200 dpi). As imagens foram então analisadas pelo software Image-Pro Plus (version 4.5, Media Cybernetics, Silver Spring, EUA) e tidas como reais, devido à calibração precisa do método.

Com as medidas obtidas no laboratório, e as medidas lineares, foram estabelecidas diferentes regressões, testando-se modelos lineares e não lineares. Na escolha do melhor modelo matemático utilizou-se a seguinte ordem de preferência: ❶ modelo matemático viável aos dados apresentados, com distribuição normal dos resíduos; ❷ equação simplificada; ❸ maior fator determinação; ❹ menor soma de quadrados do resíduo (SQR); ❺ maior valor para o teste F e ❻ os conceitos de precisão e acurácia descrito em Bussab & Morentin (2005):

$$\begin{aligned} \text{Viés} &= \bar{X} \text{ estimado} - \text{observado} \\ \text{IC (95\%)} &= \text{erro padrão da média} \times t_{\text{tabelado}} \\ \text{em que: IC} &= \text{Intervalo de confiança e } t_{\text{tabelado (5\%)}} (\infty) = 1,96 \end{aligned}$$

Determinado os modelos matemáticos, a área foliar foi estimada matematicamente por meio dos melhores ajustes da equações, frente ao modelo dito como real (Image-Pro Plus) bem como o modelo usual proposto por Barros *et al.* (1973). Para determinar a precisão da estimativa realizaram-se análises de correlações e regressões lineares simples utilizando-se como variável independente os dados utilizados anteriormente para determinação dos modelos matemáticos, conforme proposto por Sousa *et al.* (2005), Tavares-Júnior *et al.* (2002) e Campostrini & Yamanichi (2001).

Os modelos foram preditos por meio dos programas gráficos SigmaPlot 9.01 (Systat Software, Inc. EUA), Statistica 7 (StatSoft, Inc.) e DataFit 8.0.32 (Oakdale engineering).

Resultados e Discussão

Para cada medida linear tomada, foram testados inúmeros modelos matemáticos. Dentre os viáveis foram selecionados sete modelos para cada variável. Os resultados concernentes ao ajuste dos modelos de regressão são apresentados na Tabela 1.

Com a aplicação do teste de viés, descrito por Bussab & Morentin (2005), verificou-se que, para a variável maior largura do limbo, os valores preditos pelas equações 1c, 1e e 1g são viesados (tendenciosos), ou seja, diferem do real, apresentando valores sobrestimados (equações 1c e 1g) ou subestimados (equação 1e) em relação aos valores observados. O intervalo de confiança e o valor de p calculado confirmam que as diferenças entre os valores preditos e os reais são significativamente distintos ($p < 0,05$). Por outro lado, os valores preditos pelas equações 1a, 1b 1d e 1f apresentaram-se de forma não viesada (Fig 1A). Para estas equações foram traçadas as regressões para verificação do melhor ajuste para os valores estimados.

A regressão oriunda do modelo geométrico do tipo $ab^x x^c$ (equação 1b), mesmo com um maior R^2 e um menor valor de SQR, não é recomendada uma vez que há uma tendência de subestimação da área de folhas menores que 2 cm, além de apresentar um erro percentual da ordem de 50-70%. O modelo definido pela equação 1d ($Y = ax^2 + bx + c$) foi ainda pior, devido em parte, ao valor negativo da variável C, o que leva a uma área foliar negativa para valores lineares iguais ou próximos a zero, além de apresentar um erro percentual na ordem de 100%, além da tendência de subestimação da área foliar de folhas menores do que 1,5 cm de largura (Fig 1B – setas).

Embora os valores apresentados pela equação 1f não serem viesados, muito precisos e com equação simples (do tipo $ax + b$), evidencia-se que a regressão não segue a distribuição normal dos resíduos, visto que os dados não possuem comportamento linear (Fig 1C).

Tabela 1. Equações de regressão estimadas, coeficientes de determinação (\bar{R}^2) ajustado para os graus de liberdade, soma dos quadrados dos resíduos (SQR), graus de liberdade do resíduo (GLR) e F calculado da regressão da área foliar em função das medidas lineares do limbo foliar de *Coffea arabica* L.

X	Equação n.	Modelo	R ²	SQR	GLR	F Calc.	Equação
Largura	1a	Y = ax ^b	0,9638	1429,37	298	7964,82	AF = 1,8691 * L ^{1,8300}
	1b	Y = ab ^x x ^c	0,9660	1338,94	297	4247,12	AF = 1,4607 * 0,7860 ^L * L ^{2,7215}
	1c	Y = ab ^x	0,9319	2689,30	298	4093,69	AF = 2,8669 * 1,6646 ^L
	1d	Y = ax ² + bx + c	0,9634	1440,56	297	3937,05	AF = 1,1502 * L ² + 1,5996 * L - 1,1854
	1e	Y = ax ²	0,9601	1575,84	299	7220,93	AF = 1,4591 * L ²
	1f	Y = ax + b	0,9305	2746,17	298	4002,75	AF = 8,2538 * L - 8,7154
	1g	Y = ax	0,8350	6516,89	299	1519,38	AF = 5,8430 * L
Comprimento	2a	Y = ax ^b	0,9701	1179,99	298	9711,07	AF = 0,4394 * C ^{1,8200}
	2b	Y = ab ^x x ^c	0,9714	1124,70	297	5084,44	AF = 0,2191 * 0,9236 ^C * C ^{2,4710}
	2c	Y = ab ^x	0,9395	2391,33	298	4640,92	AF = 2,8484 * 1,2571 ^C
	2d	Y = ax ² + bx + c	0,9700	1182,08	297	4830,42	AF = 0,2216 * C ² + 0,8336 * C - 1,4691
	2e	Y = ax ²	0,9660	1342,50	299	8527,97	AF = 0,2924 * C ²
	2f	Y = ax + b	0,9427	2262,81	298	4921,44	AF = 3,7322 * C - 8,9597
	2g	Y = ax	0,8424	6226,31	299	1604,25	AF = 2,6212 * C
Comprimento x Largura	3a	Y = ax ^b	0,9848	600,50	298	19370,22	AF = 0,8223 * CL ^{0,9408}
	3b	Y = ab ^x x ^c	0,9854	574,62	297	10094,08	AF = 0,6140 * 0,9960 ^{CL} * CL ^{1,0665}
	3c	Y = ab ^x	0,8933	4213,69	298	2504,95	AF = 2,8669 * 1,0319 ^{CL}
	3d	Y = ax ² + bx + c	0,9853	578,64	297	10022,89	AF = -0,0016 * CL ² + 0,7326 * CL - 0,1631
	3e	Y = ax ²	0,6997	11862,76	299	699,96	AF = 0,0138 * CL ²
	3f	Y = ax + b	0,9839	635,94	298	18274,03	AF = 0,6453 * CL + 0,5473
	3g	Y = ax	0,9831	667,13	299	17464,19	AF = 0,6600 * L

Todavia, o modelo de regressão geométrico, do tipo ax^b (equação 1a) apresentou-se como o melhor modelo, uma vez que os resíduos seguem a normalidade, são acurados, precisos, apresenta um valor de R² de 0,9638, o que quer dizer que 96,38 % da variação total da área foliar é explicada pela sua relação com a largura das folhas. Além disso esse modelo mostrou um valor de SQR de 1429,37 e o maior valor de F calculado (7964,82) (Tab 1 e Fig 1D).

Para a variável comprimento, verificaram-se os mesmos comportamentos preditos para a largura. Dessa forma, conclui-se que, caso seja tomada apenas uma medida linear do limbo, o modelo geométrico é o mais adequado. Tal modelo também se adequou melhor para a estimação da área foliar de coqueiro anão (Souza *et al.*, 2005), feijão-vagem (Queiroga *et al.*, 2003) e melão (Nascimento *et al.*, 2002). Comparando-se apenas o R² desses trabalhos com os apresentados no presente estudo, verifica-se neste um maior valor absoluto, quando em comparação aos 0,95 0,91 apresentados por Souza *et al.*, (2005) e Nascimento *et al.* (2002) respectivamente; entretanto é inferior ao apresentado para feijão-vagem (Queiroga *et al.* 2003), devido, em parte, a menor quantidade de pontos coletados por esses autores.

Quando se analisa a regressão linear entre os valores de área foliar estimados pela equação geométrica e área foliar real verifica-se uma alta correlação entre essas duas medições. O R² e a correlação (r) foram sempre maiores que 0,97, entretanto quando se utilizou a variável comprimento o r foi praticamente igual a um (Fig 1E, 1F), superior aos valores da estimativa de área foliar de coqueiro anão (Souza *et al.*, 2005) e mamão (Campostrini & Yamanishi, 2001).

De modo a comparar os modelos propostos neste estudo com o modelo proposto por Barros *et al.* (1973) e corriqueiramente utilizado, foram também realizadas estimativas de área foliar utilizando-se o produto da largura e o comprimento do limbo. Como anteriormente descrito, foram testados sete modelos matemáticos (Tab 1) aos quais se aplicou o teste de viés (Fig 1G).

Dessa forma, foram descartados os modelos preditos pelas equações 3c, 3e e 3g, visto que são viesadas. Barros *et al.* (1973), Silva *et al.* (2004) e Bianco *et al.* (2005) afirmam que o melhor modelo matemático para estimação da área foliar de *Coffea arabica* L., *Annona squamosa* e *Brachiaria plantaginea* é a equação do tipo ax, fato que difere deste trabalho, devido a subestimação significativa dos valores de área foliar predita.

Os modelos estimados pelas equações 3b e 3d apresentaram tendência de subestimação de áreas dos retângulos maiores que 60 cm² (Fig 1H – seta) além da presença de C negativo (equação 3d), o que leva a valores negativos de área foliar com valores lineares iguais a zero (Fig 1H).

O modelo linear simples (ax + b – equação 3f) apresentados como o melhor modelo para estimação da área foliar em *Mangifera indica* L. (Araújo *et al.*, 2005), *Zinnia haageana* (Pinto *et al.*, 2004) e *Cucumis sativus* L. (Blanco & Folegatti, 2005) mostrou-se um bom modelo para estimação da área foliar de café, porém com a desvantagem de ser preciso

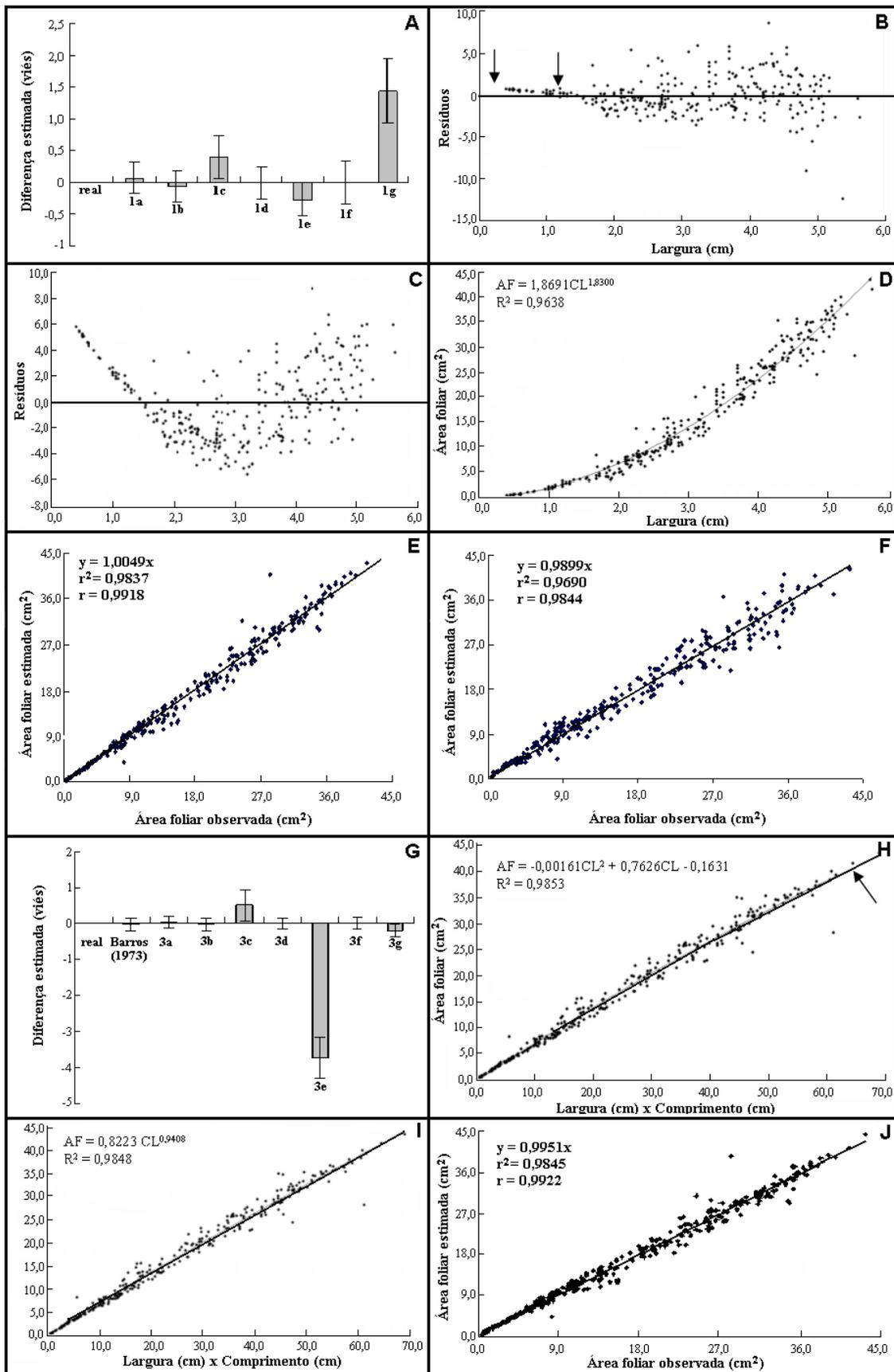


Figura 1. **A)** Diferenças estimadas pelo teste de viés para a variável maior largura do limbo. As barras verticais representam o viés e sobre estas é o intervalo de confiança 95%. **B)** Dispersão dos erros relativos do modelo 1d ($Y = ax^2 + bx + c$). **C)** Dispersão dos erros relativos do modelo $ax + b$. **D)** Análise de regressão para estimação de área foliar, através de medidas lineares de comprimento do limbo. **E)** Relação entre a área foliar estimada usando a equação matemática proposta e a área foliar medida de acordo com a equação 1a ou **F)** 2a. **G)** Diferenças estimadas pelo teste de viés para a variável maior comprimento x largura do limbo. As barras verticais representam o viés e sobre estas é o intervalo de confiança ($p \leq 0,05$). **H)** Análise de regressão para estimação de área foliar, através de medidas lineares de comprimento x largura do limbo. **I)** Análise de regressão para estimação de área foliar, através de medidas lineares de comprimento e largura do limbo. **J)** Relação entre a área foliar estimada usando a equação matemática proposta (equação 3a) e a área foliar medida.

apenas numa faixa que compreende 6 e 60 cm² de área foliar, onde se concentram em torno de 60% das folhas dos mais diversos genótipos de café cultivados atualmente no Brasil (dados não mostrados).

Dessa forma, o modelo que melhor se ajustou aos dados foi o modelo de regressão geométrica (ax^b), apesar de apresentar valores de R² (0,9848) e SQR (600,50) levemente inferior ao modelo $ab^x x^c$, devido, em parte, a tendência de subestimação de áreas foliares maiores que 60 cm², conforme descrito acima (Fig 1I).

Realizada a análise da regressão linear entre os valores de área foliar estimados pela equação geométrica e área foliar real verifica-se uma alta correlação entre estas duas medidas, o que demonstra que 99% da variação total da área foliar é explicada pela sua relação com a largura x comprimento das folhas (Fig 1J). Pelo nosso conhecimento, este é o primeiro trabalho que sugere a utilização de equação geométrica para estimação da área foliar utilizando como parâmetros as dimensões do comprimento e largura do limbo.

Conclusões

Independente da variável mensurada, o modelo matemático geométrico, do tipo ax^b apresentou-se como a melhor opção para a estimativa da área foliar do cafeeiro, independente da idade fisiológica das folhas.

De forma a diminuir a manipulação dos dados, no campo e no laboratório, e devido a alta precisão e acurácia das medições, recomenda-se que a área foliar do cafeeiro arábica seja estimada utilizando-se de valores de comprimento como única medida a ser tomada. Porém, a folha do cafeeiro, pode apresentar pequenas deformações ao longo do limbo, à medida que atinge sua completa expansão fato que pode comprometer a medição do comprimento. Nesse caso específico poder-se-á substituir essa medição pelos valores de largura, fato que não diminui a precisão da estimativa. Não obstante, quando se necessita de uma medida mais acurada de um pequeno volume de folhas recomenda-se a utilização do método proposto pela equação 3a.

Assim, a escolha do método a ser utilizado depende do objetivo do trabalho, do grau de precisão desejado, do tamanho da amostra, da morfologia das folhas, dos equipamentos disponíveis, dos custos envolvidos e do tempo que poderá ser despendido.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café pelo auxílio financeiro e pela concessão de bolsas de estudo aos autores.

Referências Bibliográficas

- Araújo ECE, *et al.* 2005. Estimativa da área foliar da mangueira (*Mangifera indica* L.) cvs. Tommy Atkins e haden, utilizando dimensões lineares. Revista Brasileira de Fruticultura, 27 (2): 308-309.
- Barros RS *et al.* 1973. Determinação de áreas de folhas do café (*Coffea arabica* L. cv. 'Borbon Amarelo'). Revista Ceres, 20 (107): 44-52.
- Bianco S, *et al.* 2005. Estimativa da área foliar de *Brachiaria plantaginea* usando dimensões lineares do limbo foliar. Planta Daninha, 23 (4): 597-601.
- Blanco FF, Folegatti MV. 2005. Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. Scientia Agricola, 62 (4): 305-309.
- Bussab WO, Morentin PA. 2005. Estimação. In: Bussab WO, Morentin PA. *Estatística Básica*. 5. ed. São Paulo: Saraiva, p.289-322.
- Campostrini E, Yamanishi OK. 2001. Estimation of papaya leaf area using the central vein length. Scientia Agricola, 58 (1): 39-42.
- Marshall JK. 1968. Methods of leaf area measurement of large and small leaf samples. Photosynthetica, 2 (1): 41-47.
- Mielke MS, *et al.* 1995. Comparação de métodos de laboratório e de campo para a estimativa da área foliar em fruteiras silvestres. Scientia agricola, 52 (1): 82-88.
- Nascimento IB, *et al.* 2002. Estimativa da área foliar do meloeiro. Horticultura Brasileira, 20 (4): 555-558.
- Queiroga JL, *et al.* 2003. Estimativa da área foliar do feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) por meio da largura máxima do folíolo central. Horticultura Brasileira, 21 (1): 64-68.
- Silva PSL, *et al.* 2004. Leaf area estimates of custard apple tree progenies. Revista Brasileira de Fruticultura, 26 (3): 558-560.
- Sousa EF, *et al.* 2005. Estimating the total leaf area of the green dwarf coconut tree (*Coccus nucifera* L.). Scientia Agricola, 62 (6): 597-600.
- Tavares-Júnior JE, *et al.* 2002. Análise comparativa de métodos de estimativa de área foliar em cafeeiro. Bragantia, 61 (2): 199-203.