

# ESTIMATIVA DE ÁREA DE FOLÍOLOS DE SOJA USANDO IMAGENS DIGITAIS E DIMENSÕES FOLIARES <sup>(1)</sup>

MARCOS ADAMI <sup>(2)</sup>; FÁBIO ALCOVER HASTENREITER <sup>(3)</sup>; DANILTON LUIZ FLUMIGNAN <sup>(3)</sup>,  
ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA <sup>(3\*)</sup>

## RESUMO

Medidas do índice de área foliar são necessárias para a maioria dos estudos agrônômicos e fisiológicos envolvendo crescimento vegetal. Foi desenvolvido um experimento no Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), em Londrina (PR), durante a safra 2005/2006, com objetivo de avaliar dois métodos diretos de medição de área de folíolos de soja por meio de dimensões foliares e por imagens digitais capturadas por máquina fotográfica digital amadora, em duas situações distintas, folíolos íntegros e folíolos danificados. As estimativas obtidas foram comparadas com as medidas feitas com um integrador de área foliar LI-COR<sup>®</sup>, modelo LI 3100, tomado como referência. Nas estimativas realizadas em folíolos íntegros, tanto pelo método de dimensões foliares como no de imagem digital, notou-se excelente concordância com as medidas obtidas pelo método LI-COR<sup>®</sup> ( $R^2 = 0,983$  e  $R^2 = 0,997$  respectivamente). Para folíolos danificados, o método de imagem digital revelou coeficiente de determinação um pouco superior ao método de dimensões foliares, mas com um erro-padrão três vezes menor. O método de imagem digital pode substituir o método usado como referência (LI 3100) com vantagens de custo inferior e acuracidade similar.

**Palavras-chave:** índice de área foliar, imagem digital, LI-COR<sup>®</sup>.

## ABSTRACT

### SOYBEAN LEAFLET AREA ESTIMATION USING DIGITAL IMAGERY AND LEAF DIMENSIONS

Measurements of leaf area index are required in most of agronomic and physiological studies involving plant growth. Two direct methods for estimation of soybean leaf area (leaf dimensions and digital images captured by ordinary digital cameras) were evaluated, in two distinct conditions (entire leaf and damaged leaf). The estimations were compared with measurements taken by a LI-COR<sup>®</sup> leaf area meter (model LI 3100), used as control. Both methods gave good estimations for entire leaf ( $R^2 = 0.983$  for leaflet dimensions and  $R^2 = 0.997$  for digital image). However, the evaluations of damaged leaves showed slightly better performance of digital image method, but a standard error three times lower as compared with leaf dimensions method. As a conclusion, the digital image method using ordinary cameras can replace the reference method (LI 3100) with advantages of lower cost and similar accuracy.

**Key words:** leaf area index, digital imagery, LI-COR<sup>®</sup>.

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em 26 de abril de 2007 e aceito em 24 de julho de 2008.

<sup>(2)</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Caixa Postal 515, 12245-970 São José dos Campos (SP), Brasil. E-mail: adami@dsr.inpe.br

<sup>(3)</sup> Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR, Área de Engenharia Agrícola, Caixa Postal 481, 86047-902 Londrina (PR), Brasil. E-mail: rtfaria@iapar.br (\*) Autor para correspondência.

## 1. INTRODUÇÃO

O índice de área foliar (IAF) é a relação entre a área foliar e a área do terreno ocupada pela cultura, sendo considerado um parâmetro indicativo de produtividade (FAVARIN et al., 2002). É uma medida necessária para a maioria dos estudos agrônômicos e fisiológicos envolvendo crescimento vegetal (BLANCO e FOLEGATTI, 2003) e na avaliação de várias práticas culturais (FAVARIN et al., 2002; TAVARES-JÚNIOR et al., 2002).

A determinação de área foliar pode ser realizada por métodos diretos ou indiretos, destrutivos ou não-destrutivos. Os métodos diretos são aqueles que utilizam medições realizadas diretamente nas folhas. Os métodos indiretos baseiam-se na correlação conhecida entre a variável medida e área foliar. Os métodos destrutivos exigem a retirada da folha ou outras estruturas, o que muitas vezes não é possível devido à limitação do número de plantas na parcela experimental. Nos métodos não-destrutivos, as medidas são tomadas na planta, sem necessidade de remoção de estruturas, preservando sua integridade e permitindo a continuidade das medições na mesma planta.

Existem na literatura vários métodos de determinação de área foliar, sendo os mais utilizados: o método por discos foliares, o método de dimensões foliares e o método por equipamento medidor LI-COR®. O método por discos foliares é o mais tradicional, porém é muito trabalhoso. Consiste em determinar a área foliar a partir do produto entre massa total de folhas secas e sua massa foliar específica, obtida pela pesagem de discos foliares de área conhecida, usualmente coletados da parte central das folhas com um perfurador metálico (Pereira e Machado, 1987). O método de dimensões foliares baseia-se na relação entre área foliar e parâmetros dimensionais do limbo foliar, os extremos do comprimento (C) e largura (L). Este método é amplamente empregado no campo devido à sua facilidade de aplicação e possibilidade de aplicação não-destrutiva.

Atualmente, câmeras digitais são equipamentos promissores para medição de área foliar em campo por serem portáteis, mais baratas que o LI-COR® e talvez mais precisos que os métodos de dimensões foliares e discos foliares, principalmente em situações nas quais as folhas estão danificadas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar dois métodos de determinação de área de folíolos de soja: a) por meio de dimensões foliares e b) por imagens digitais capturadas por câmera fotográfica digital, em duas situações distintas: folíolos íntegros e folíolos danificados.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), em Londrina (PR), durante a safra 2005/2006. Foram avaliados dois métodos de determinação de área foliar (AF) de soja: dimensões foliares e imagem digital, em duas situações distintas: folhas íntegras e folhas danificadas.

Para utilizar o método de dimensões foliares, inicialmente foram determinados os coeficientes de regressão linear entre AF e o produto CxL para a variedade utilizada. Uma amostra composta por 60 folíolos de soja, denominada "amostra secundária", foi coletada ao acaso em diferentes posições do dossel de plantas, tomadas ao acaso, em uma lavoura de soja de cv. Coodetec 205, em área de cerca de 5 ha. As plantas estavam em estágio vegetativo, cerca de 35 dias após a emergência, com bom desenvolvimento, em decorrência da nutrição mineral e do controle fitossanitário adequados. Em laboratório, foram medidos, com uma régua padrão, C e L de cada folíolo da amostra e, em seguida, determinou-se a AF por um integrador de área foliar da marca LI-COR®, modelo LI 3100. Os folíolos foram passados pelo aparelho, um a um, em ordem numérica, e os valores de AF retornados, anotados em uma tabela. Eventualmente, foram realizados ajustes e limpeza na superfície do aparelho, que entrou em contato com as amostras. O produto entre C e L dos 60 folíolos e AF medida pelo integrador de área foliar foram ajustados por regressão linear.

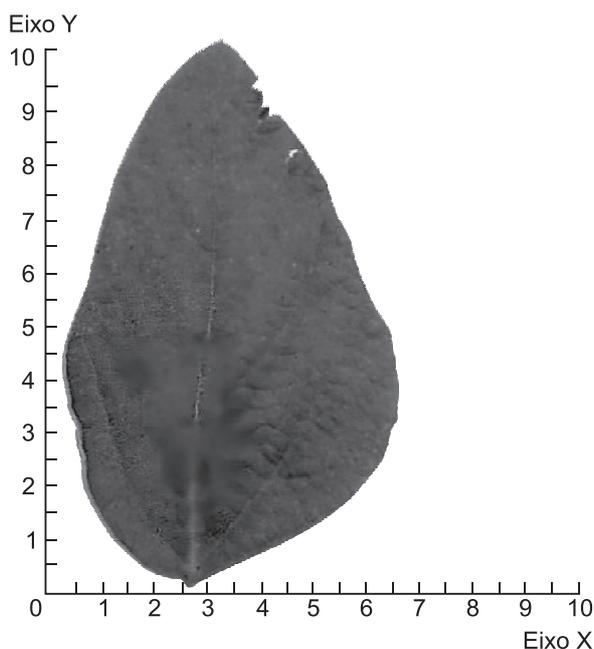
A comparação dos tratamentos foi realizada com 60 folíolos de soja, também da cv. Coodetec 205, obtidos em outra amostra, denominada "amostra principal", coletada em lavoura de aproximadamente 3 ha, também localizada no IAPAR, durante a safra 2005/2006. Os folíolos foram coletados seguindo o mesmo método empregado para obtenção da "amostra secundária". No momento da coleta, as plantas estavam com bom desenvolvimento e estavam em estágio de pré-florescimento.

No laboratório, a "amostra principal" foi analisada primeiramente para a condição de folhas íntegras, na seguinte seqüência: medição das dimensões foliares com régua padrão e determinação de AF pela equação de regressão ajustada para a "amostra secundária", conforme descrito anteriormente.

Em seguida, foi realizada a determinação de AF pelo método imagem digital. O método de imagem digital consistiu da captura de imagens de folíolos abertos contra um fundo de cor maciça, por meio de uma câmera fotográfica digital, da marca SONY® e modelo DSC-P72. Para calcular AF em imagens

digitais, deve-se tomar como base a escala e a resolução em que foi obtida a fotografia. Além disso, necessita-se de um programa que calcula a área de cada elemento que compõe a imagem (*pixel*) e possibilite sua classificação por meio da divisão da imagem em classes: folha e não folha. É importante também que o programa integre os elementos que pertencem à mesma categoria e desta forma calcule a área da classe de interesse. O SPRING é um programa com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais (CÂMARA et al., 1996). Este programa tem distribuição gratuita e atende às funcionalidades desejadas. Desta forma, o processamento das imagens foi realizado no programa SPRING.

As imagens utilizadas foram geradas com definição de 300 dpi e com escala variável. Neste método, calculou-se a área com base na escala e na resolução em pontos por polegada (dpi), na qual foi obtida a fotografia. Estes dados foram usados no SPRING para medir a área de cada *pixel* e integrar os elementos pertencentes à mesma categoria. A figura 1 ilustra uma fotografia utilizada para o cálculo de AF. Os eixos (X e Y), graduados em centímetros (cm), foram utilizados para determinar o fator de correção da escala da imagem.



**Figura 1.** Exemplo de imagem utilizada para estimativa da área de folíolos de soja pelo método de imagem digital, na qual se observa a escala de valores (eixos X e Y).

As imagens foram exportadas para o SPRING e, devido ao ângulo e à distância variáveis em que foram obtidas, corrigiu-se a escala na análise de cada fotografia pela Equação 1:

$$res_{fin} = res_{ini} \frac{Vo_{ei}}{Vm_{ei}} \quad (1)$$

na qual  $res_{fin}$  é a resolução final do eixo  $i$  (cm),  $res_{ini}$  é a resolução inicial do eixo  $i$  (cm) calculada pela relação  $2,54 \text{ cm dpi}^{-1}$ , sendo  $dpi$  a definição na qual foi obtida a fotografia,  $Vo_{ei}$  é o valor original do eixo  $i$  e  $Vm_{ei}$  é o valor medido do eixo  $i$ .

Aplicando-se a equação de correção de escala, determinaram-se as dimensões do pixel em X e Y. Em seguida, realizou-se a classificação automática das imagens pelo programa, que possibilitou o dimensionamento da área de cada folíolo, dada pela Equação 2:

$$AF = \sum_{i=1}^n res_{exi} res_{eyi} \quad (2)$$

sendo AF a área do folíolo estimada ( $\text{cm}^2$ ),  $i$  o índice utilizado para representar os elementos classificados como folha,  $i=1, \dots, n$ ,  $res_{exi}$  a resolução final do *pixel*, no eixo X, na posição  $i$  e  $res_{eyi}$  a resolução final do *pixel*, no eixo Y, na posição  $i$ .

Por último, a AF foi determinada pelo método LI-COR. Em seguida, os folíolos foram danificados. Estes danos foram produzidos por cortes com tesoura, simulando a condição em que nas folhas tivesse ocorrido algum processo, natural ou artificial, de redução de AF. Os cortes foram realizados aleatoriamente no limbo dos folíolos, visando reduzir aproximadamente 15% de AF. A análise da AF dos folíolos danificados seguiu a mesma metodologia descrita para os folíolos integros.

Os métodos de dimensões foliares e imagem digital foram comparados, por análise de regressão ( $Y_1 = b_0 + b_1 X + e_i$ ), com as medidas de AF obtidas pelo aparelho integrador de AF LI 3100. Para a comparação dos métodos foram estabelecidos os limites de confiança de 95%, para verificar se o coeficiente angular do modelo de regressão ( $b_1$ ) poderia ser 1 e o coeficiente linear ( $b_0$ ) poderia ser 0 (hipóteses nula), o que corresponde à equivalência entre os métodos. As determinações foram avaliadas também pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro-padrão.

Como índice de precisão da estimativa utilizou-se o índice de concordância ( $d$ ), proposto por Willmott (1981), cuja formulação é a seguinte:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \right] \quad (3)$$

em que  $P$  é o valor estimado pelo modelo,  $O$  o valor observado, representa o valor estimado menos a média dos valores observados e  $O$  o valor observado menos a média dos valores observados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A equação de regressão linear entre  $AF$  e o produto  $CxL$ , ajustada ( $R^2 = 0,987$ ) para a variedade Coodetec 205 utilizando a “amostra secundária” resultou na seguinte relação:

$$AF_{df} = 0,7104 (CxL) \tag{4}$$

sendo  $AF_{df}$  a área de folíolos ( $cm^2$ ) estimada pelo método de dimensões foliares e  $CxL$  o produto do comprimento máximo e a largura máxima do folíolo (ambos em  $cm$ ).

O método de dimensões foliares superestimou o valor de  $AF$  nas duas situações avaliadas, ligeiramente para folíolos íntegros e expressivamente para folíolos danificados (Figura 2, Tabela 1). Nas estimativas realizadas com folíolos danificados esta tendência era esperada, uma vez que o método toma como base as dimensões do limbo e ignora sua integridade, enquanto o método tomado como referência mede a superfície do limbo. Este estudo concorda com os resultados de MONTEIRO et al. (2005), que realizaram um trabalho para estimar  $AF$  do algodoeiro por meio de dimensões foliares e também observaram a ineficiência deste método quando aplicado em folhas com o limbo danificado. Nas estimativas realizadas com folíolos íntegros pelo método de dimensões foliares também ocorreu a superestimativa. Esse fato pode ter ocorrido em consequência da utilização de plantas semeadas em épocas diferentes para a calibração da Equação 4 (“amostra secundária”) e para a comparação dos métodos (“amostra principal”). Este resultado demonstra a dependência do método de dimensões foliares de uma fonte de calibração, em condições similares a que o método será aplicado.

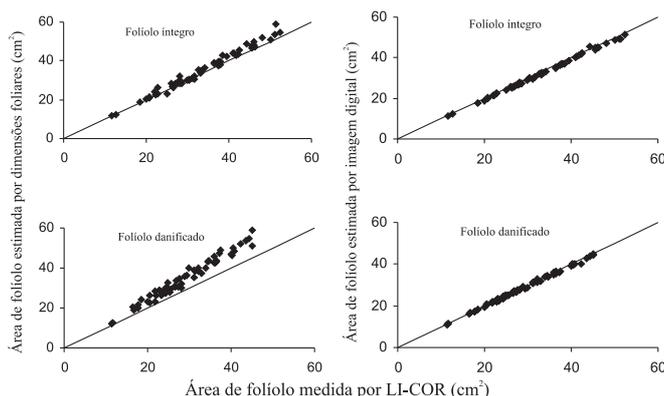


Figura 2. Comparação entre a área de folíolos de soja íntegros e danificados, determinada pelos métodos de dimensões foliares e imagem digital, com a medida pelo método LI-COR

Em ambos os casos, folíolos íntegros e danificados, para o método de dimensões foliares, há a probabilidade do intercepto ( $b_0$ ) ser zero, entretanto o coeficiente angular não foi igual a 1 ( $b_1$ ) com 5% de significância (Tabela 1). Isto indica que as médias das áreas geradas por este método e pelo método de referência são estatisticamente diferentes com este nível de significância. Este resultado discorda dos estudos de TAVARES JÚNIOR et al. (2002), ao comparar a estimativa de  $AF$  de café gerada pelo método de dimensões foliares com o método de referência. Apesar disto, em ambos os casos, o valor do índice de concordância ( $d$ ) foi próximo à unidade, indicando bom ajuste entre a função e os dados observados.

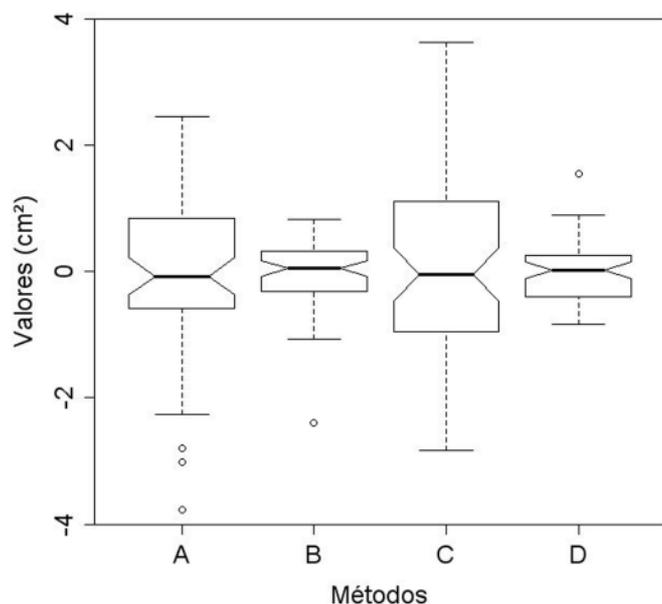
O método de imagem digital permitiu excelentes medidas de  $AF$ , como pode ser observado pela proximidade dos pontos à reta 1:1 (Figura 2) e pelos limites estimados para o coeficientes  $b_0$  e  $b_1$ , com significância de 5% (Tabela 1). Para todas as situações avaliadas pelo método, o intercepto teve probabilidade de ser zero, comprovando que as estimativas não são afetadas pela ação do coeficiente linear (Tabela 1).

Tabela 1. Valores dos limites inferior e superior do intercepto ( $b_0$ ) e do coeficiente angular ( $b_1$ ) estimados para os métodos de dimensões foliares e imagem digital realizados em folíolos íntegros e danificados de soja

Tipo de folíolo	Método	$\beta_0$		$\beta_1$	
		95 Inferiores	95 Superiores	95 Inferiores	95 Superiores
Íntegro	Dimensões foliares	-1,912	0,410	0,969	0,997
	Imagem digital	-0,039	0,908	0,999	1,027
Danificado	Dimensões foliares	-1,601	0,980	0,798	0,882
	Imagem digital	-0,314	0,570	0,996	1,025

O coeficiente angular tem probabilidade de ser igual a 1 ( $b_1$ ) com 5% de significância (Tabela 1). Esses parâmetros indicam que as médias das áreas geradas pelo método de imagem digital e o método de referência (LI-COR) são estatisticamente iguais. Estes resultados concordam com os obtidos por TAVARES-JÚNIOR et al. (2002), em trabalho que avaliou um método para estimativa de AF para café, por meio de imagens digitais obtidas por *scanner* de mesa e processadas pelo programa SIARCS 3.0.

A dispersão das estimativas (erro-padrão) geradas pelo método de dimensões foliares foi maior do que a dispersão das medidas obtidas pelo método de imagem digital (Figuras 2 e 3 e Tabela 2). Pelo método de imagem digital ocorreu erro-padrão de  $0,515 \text{ cm}^2$ , menor que a metade do observado pelo método de dimensões foliares,  $1,301 \text{ cm}^2$ , nos testes com folíolos íntegros. No caso dos testes com folíolos danificados, no método de imagem digital houve erro-padrão de  $0,474 \text{ cm}^2$ , e no método de dimensões foliares,  $1,422 \text{ cm}^2$  (Tabela 2). Na figura 3, observa-se o *boxplot* dos resíduos destas análises. Pode-se verificar que, para todas as análises, 95% dos resíduos estão contidos entre -1 e  $1 \text{ cm}^2$ . Esta dispersão dos dados, revela que o tamanho amostral adotado atende às necessidades do trabalho. O aumento do tamanho amostral geraria resultados próximos aos obtidos, mantendo a mesma tendência.



**Figura 3.** Boxplot dos resíduos resultantes da comparação entre o método de referência : A) dimensões foliares com folíolos íntegros; B) imagem digital com folíolos íntegros; C) dimensões foliares com folíolos danificados; D) imagem digital com folíolos danificados.

Pelo método de imagem digital os coeficientes de determinação ficaram muito próximos a um ( $R^2 = 0,997$ ), nas duas situações testadas, enquanto pelo método de dimensões foliares foi ligeiramente inferior, mas também alto ( $R^2 > 0,972$ ). MONTEIRO et al. (2005) obtiveram valores de  $R^2$  inferiores ( $0,810$  a  $0,957$ ) para estimativa de área foliar de algodoeiro pelo método  $C \times L$ . O'NEAL et al. (2002) constataram coeficientes de determinação próximos de 1 para estimativas realizadas pelo método de imagens digitais geradas por escaner de mesa e processadas pelo programa SIARCS 3.0. Resultados semelhantes foram obtidos por TAVARES-JÚNIOR et al. (2002) trabalhando com folhas de café.

Os resultados de ambos os métodos são muito bons, determinam AF com ajuste de 99% da variância em relação à referência (Tabela 2); entretanto, o método de imagem digital não depende de medidas para calibração da função, enquanto o método de dimensões foliares depende das medidas do método LI-COR para o ajuste da função.

**Tabela 2.** Erro-padrão, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e índice de concordância (d), obtido pelo teste de Willmott (1981) para os métodos de dimensões foliares e imagem digital realizados em folíolos íntegros e danificados de soja

Tipo de folíolo	Método	Erro-padrão $\text{cm}^2$	$R^2$	d
Íntegro	Dimensões foliares	1,301	0,983	0,996
	Imagem digital	0,515	0,997	0,999
Danificado	Dimensões foliares	1,422	0,972	0,993
	Imagem digital	0,474	0,997	0,999

Ao se comparar o método de imagem digital ao método LI-COR, pode-se afirmar que as medidas de área geradas por ambos os métodos são estatisticamente iguais, pois há a probabilidade do intercepto ( $b_0$ ) ser igual a zero e a inclinação da reta ser igual a 1 ( $b_1$ ) (Tabela 1). O grande diferencial entre estes dois métodos é o preço do aparelho. Atualmente, é possível adquirir uma câmara digital com resolução máxima de 4 megapixels por cerca de R\$ 500,00, enquanto um aparelho LI-COR custa aproximadamente R\$ 10.000,00. Além disso, pelo método proposto, o programa para processamento é de distribuição gratuita, não representando custo adicional ao procedimento.

#### 4. CONCLUSÕES

1. O método de dimensões foliares é impreciso na estimativa de área de folíolos danificados, sendo dependente de um método de calibração.

2. O método de imagem digital permite excelente medida de AF, tanto para folíolos íntegros quanto para danificados, com precisão similar ao aparelho integrador de AF LI-COR<sup>®</sup>, mas com vantagens de menor custo e sem a dependência de um método de calibração.

#### REFERÊNCIAS

BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.21, n.4, p.666-669, outubro/dezembro 2003.

CAMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**, New York, v.20, n.3, p.395-403, 1996.

FAVARIN, J.L.; DOURADO-NETO, D.; GARCÍA, A.G.; VILLA NOVA, N.A.; FAVARIN, M.G.G.V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.6, p.769-773, 2002.

LI-COR<sup>®</sup>. **LI 3100 area meter instruction manual**. Lincoln: LI-COR<sup>®</sup>, 1996. 34p.

MONTEIRO, J.E.B.A.; SENTELHAS, P.C.; CHIAVEGATO, E.J.; GUISELINI, C.; SANTIAGO, A.V.; PRELA, A. Estimação da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.1, p.15-24, 2005.

O'NEAL, M.E.; LANDIS, D.A.; ISAACS, R. An inexpensive, accurate method for measuring leaf area and defoliation through digital image analysis. **Journal of Economic Entomology**, Lanham, v.95, n.6, p.1190-1194, 2002.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidade vegetais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1987. (Boletim n.114)

TAVARES-JÚNIOR, J.E.; FAVARIN, J.L.; DOURADO-NETO, D.; MAIA, A.H.N.; FAZUOLI, L.C.; BERNARDES, M.S. Análise comparativa de métodos de estimativa de área foliar em cafeeiro. **Bragantia**, Campinas, v.61, n.2, p.199-203, 2002.

WILLMOTT, C. F. On the validation of models. **Physical Geography**, Kelowna, v.2, n.2, p.184-194, 1981.