

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JULIANA OLIVEIRA DE CARVALHO

**ESTIMAÇÃO DA ÁREA FOLIAR DE CROTALARIA JUNCEA POR DIMENSÕES
LINEARES DAS FOLHAS**

Itaqui

2015

JULIANA OLIVEIRA DE CARVALHO

**ESTIMAÇÃO DA ÁREA FOLIAR DE CROTALARIA JUNCEA POR DIMENSÕES
LINEARES DAS FOLHAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pampa, campus Itaqui, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Marcos Toebe

Itaqui

2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C331e Carvalho, Juliana Oliveira

ESTIMAÇÃO DA ÁREA FOLIAR DE CROTALARIA
JUNCEA POR DIMENSÕES LINEARES DAS FOLHAS /

Juliana Oliveira Carvalho – 19/11/2015.

29 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pampa, INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA, 2015.

"Orientação: Marcos Toebe".

1. Métodos não destrutivos. 2. Processamento de imagens. 3.
Plantas de cobertura. 4. Validação de modelos. I. Título.

JULIANA OLIVEIRA DE CARVALHO

**ESTIMAÇÃO DA ÁREA FOLIAR DE CROTALARIA JUNCEA POR DIMENSÕES
LINEARES DAS FOLHAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Bacharelado Interdisciplinar em
Ciência e Tecnologia da Universidade Federal
do Pampa, campus Itaqui, como requisito
parcial para obtenção do Título de Bacharel
em Ciência e Tecnologia.

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em: 19 de novembro de 2015.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Marcos Toebe

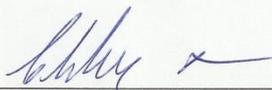
Orientador

UNIPAMPA



Prof. Dr. Amauri Nelson Beutler

UNIPAMPA



Prof. Dr. Cleber Maus Alberto

UNIPAMPA

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus pais, Daniela e José, por terem me dado uma boa educação, repleta de respeito, apoio e acima de tudo com muito amor. Vocês são minha fonte inspiradora.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus sinceros agradecimentos a uma pessoa que batalhou muito para que eu conseguisse concluir a graduação, a minha mãe Daniela, sendo compreensiva, companheira e amorosa.

A toda a minha família que sempre me deu apoio e suporte para seguir meu caminho, que apesar da ausência física, jamais deixaram de me incentivar.

Ao meu companheiro Paulo Paim.

Em especial ao Prof. Dr. Marcos Toebe, pela orientação e ajuda na realização dos estudos e trabalhos, pela paciência e conselhos dados como amigo e como profissional, os quais foram essenciais para todo o meu aprendizado e formação.

Aos companheiros de trabalho do Grupo de Pesquisa em Estatística e Experimentação Agronômica (GPEEA), principalmente à Francieli de Lima Tartaglia e Alessandra Cortes, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando e auxiliando tanto no trabalho quanto na vida pessoal.

As amigas Renata Dornelles e Jaqueline Nogueira, pelo apoio.

Aos professores que contribuíram para a minha formação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de iniciação científica e auxílio financeiro.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estimar a área foliar de *Crotalaria juncea* em função de dimensões lineares das folhas. Foram conduzidos dois experimentos com *C. juncea* cultivar IAC-KR1, em épocas de semeadura de 2014/2015. Aos 59, 82, 102 e 129 dias após a semeadura (DAS) do primeiro e aos 61, 80, 92 e 104 DAS do segundo experimento, foram coletadas 500 folhas, totalizando 4.000 folhas. Em cada folha, foram mensuradas as dimensões lineares (comprimento, largura e produto comprimento×largura) e determinada a área foliar por meio dos softwares Digimizer e Sigma Scan Pro, após digitalização de imagens. Depois, 3.200 folhas foram separadas aleatoriamente para a geração de modelos matemáticos da área foliar (Y) em função das dimensões lineares (x) e 800 folhas para a validação dos modelos. Em *C. juncea*, os modelos de estimação da área foliar em função do produto comprimento×largura apresentaram ajustes superiores aos obtidos com base na avaliação de apenas uma dimensão linear (comprimento ou largura). O modelo linear $\hat{Y}=0,7390x$ ($R^2=0,9849$) da área foliar real (\hat{Y}) em função do produto comprimento×largura (x) é adequado para estimar a área foliar de *C. juncea*.

Termos para indexação: métodos não-destrutivos, processamento de imagens, plantas de cobertura, validação de modelos.

ABSTRACT

The objective of this work was to estimate the *Crotalaria juncea* leaf area by linear dimensions of the leaves. Two experiments were conducted with *C. juncea* IAC-KR1 in 2014/2015 sowing seasons. At 59, 82, 102 and 129 days after sowing (DAS) of the first and at 61, 80, 92 and 104 DAS of the second experiment, 500 leaves were collected, totaling 4,000 leaves. In each leaf, were measured the linear dimensions (length, width and the product length×width) and determined the leaf area by Digimizer and Sigma Scan Pro softwares, after scanning images. Then, 3,200 leaves were separated randomly to generate mathematical models of the leaf area (Y) as a function of linear dimension (x) and 800 leaves were separated for the validation of models. In *C. juncea*, the models of leaf area depending of the product length×width presented higher adjustments to the obtained based on the evaluation of just one linear dimension (length or width). The linear model $\hat{Y}=0.7390x$ ($R^2=0.9849$) of the leaf area (\hat{Y}) depending of the product length×width (x) is suitable for estimation of *C. juncea* leaf area.

Keywords: non-destructive methods, image processing, cover crops, model validation.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Número de folhas (n), mínimo, máximo, média, mediana, variância, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), erro padrão (EP), assimetria e curtose para variáveis avaliadas em 3.200 folhas de *Crotalaria juncea* - mensuração de 400 folhas por avaliação em cada época de semeadura - utilizadas para a geração dos modelos de estimação da área foliar em função de dimensões lineares, na safra 2014/2015, em Itaqui - RS - Brasil.....25
- Tabela 2. Número de folhas (n), mínimo, máximo, média, mediana, variância, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), erro padrão (EP), assimetria e curtose para variáveis avaliadas em 800 folhas de *Crotalaria juncea* - mensuração de 100 folhas por avaliação em cada época de semeadura - utilizadas apenas para a validação dos modelos de estimação da área foliar em função de dimensões lineares, na safra 2014/2015, em Itaqui - RS - Brasil.....26
- Tabela 3. Modelos do tipo potência, quadrático e linear para a determinação da área foliar real (Y) - utilizando o comprimento, a largura e/ou o produto comprimento vezes largura como variáveis independentes (x) - e, coeficiente de determinação (R^2) de cada modelo, com base em 3.200 folhas de *Crotalaria juncea*. Validação dos nove modelos com base nos indicadores: coeficientes linear (a), angular (b), de correlação linear de Pearson (r) e de determinação (R^2), erro absoluto médio (EAM) e índice d de Willmott (d), calculados com base nas áreas foliares observadas e estimadas de 800 folhas de *Crotalaria juncea*, na safra 2014/2015, em Itaqui - RS - Brasil.....27

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. (A) Matriz com histograma de frequência (na diagonal) e gráficos de dispersão entre comprimento (em cm), largura (em cm), produto comprimento vezes largura (em cm^2) e a área foliar real (em cm^2) de 3.200 folhas de *Crotalaria juncea*. (B) Relação entre a área foliar determinada pelo software Digimizer e a área foliar determinada pelo software Sigma Scan Pro, em 3.200 folhas de *Crotalaria juncea*.....28
- Figura 2. (A) Relação entre a área foliar real e a área foliar estimada pelo modelo linear $\hat{Y} = 0,7390x$ ($R^2 = 0,9849$), em 800 folhas de *Crotalaria juncea* utilizadas na validação, sendo x o produto do comprimento \times largura de cada folha. (B) Resíduo do modelo - valor estimado menos valor real da área foliar - para cada uma das 800 folhas de *Crotalaria juncea* utilizadas na validação do modelo.....29

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVO	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 JUSTIFICATIVA	14
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
6 CONCLUSÕES	20
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

1 INTRODUÇÃO

A *Crotalaria juncea*, originária da Índia e Ásia Tropical, é uma leguminosa de crescimento rápido, que apresenta tolerância aos solos de mediana fertilidade e desenvolve-se bem em solos argilosos e arenosos, com elevado potencial de produção de fitomassa em condições adequadas de precipitação pluvial (200 mm a 400 mm) (EMBRAPA, 2014). A espécie tolera solos com pH de até 8,4 e se estabelece melhor em solos de pH entre 5,0 e 7,0 (VALENZUELA & SMITH, 2002). Seu sistema radicular é pivotante e profundo, o que auxilia na infiltração da água, capacidade de fixação de nitrogênio e na ciclagem de nutrientes no perfil do solo (EMBRAPA, 2014).

As plantas de cobertura, em geral, vêm sendo usadas como alternativa para melhoria do potencial produtivo das áreas agrícolas (EMBRAPA, 2014). Nesse sentido, a *C. juncea* contribui para a melhoria da fertilidade do solo, pois de acordo com Fontanétti et al. (2006), a planta apresenta alta eficiência na produção de matéria seca, absorção e acúmulo de nutrientes quando comparada com outras leguminosas como mucuna-preta e feijão de porco. Estudos realizados constataram que a *C. juncea* apresenta elevada quantidade de nutrientes como N, K, Ca, Mg e P acumulados na sua matéria seca, contribuindo como adubo verde e na ciclagem de nutrientes do solo (EMBRAPA, 2014), estando de acordo com trabalho desenvolvido por Fontanétti et al. (2006).

Com o cultivo da *C. juncea*, pode haver aumento de produtividade em culturas em rotação ou em culturas intercaladas (EMBRAPA, 2014). A leguminosa pode incorporar ao solo até 173 kg ha⁻¹ de N quando isolada e 89 kg ha⁻¹ de N quando em consórcio com milho. A *Crotalaria* consorciada ao milho contribui com 65% da fitomassa produzida e eleva a produtividade em 13% comparativamente ao cultivo isolado do milho (PERIN et al., 2004). A espécie também pode ser implantada como forma de manejo e controle em áreas infestadas por fitonematoides, auxiliando na redução da densidade populacional tanto por produzir um composto nematicida tóxico, chamado de monocrotaline (VALENZUELA & SMITH, 2002), quanto por aumentar a população de microrganismos desfavoráveis aos nematoides (EMBRAPA, 2014). Populações de nematoides como de *Meloidogyne javanica*, *Scutellonema bradys*, *Rotylenchulus reniformis*, *Meloidogyne spp*, *Meloidogyne arenaria*, *Radopholus similis*, *Trichodorus cristiei*, *Xiphenema americanum*, *Belonolaimus longicaudatus* e *Helicotylenchus multicinctus* apresentaram redução com a utilização da *C. juncea* em diversos estudos (GARRIDO et al., 2008; INOMOTO et al., 2008; MORAES et al., 2006; VALENZUELA & SMITH, 2002).

A *Crotalaria* por ser uma espécie que floresce em dias curtos, possui maior crescimento em cultivos conduzidos na primavera/verão, obtendo-se maiores produções de massa seca se semeada em outubro, novembro e dezembro (VALENZUELA & SMITH, 2002). Estudos realizados por Leal et al. (2012), revelam que a melhor época de semeadura para obtenção de maiores valores de matéria seca e acúmulo de nitrogênio na parte aérea é a primavera e, que as plantas devem ser cortadas aos 4 meses por apresentarem elevada concentração de nitrogênio.

A análise de crescimento descreve as condições morfofisiológicas da planta em diferentes intervalos de tempo, permitindo acompanhar a dinâmica da produtividade, avaliada por índices fisiológicos e bioquímicos (MAGALHÃES, 1986). A área foliar representa o aparato de interceptação de luz para a fotossíntese e é uma característica utilizada em análises do crescimento vegetal (FONSECA & CONDÉ, 1994). Fatores relacionados à área foliar como a fotossíntese e taxa de transpiração, afetam diretamente a qualidade e a produtividade da planta (ASNER et al., 2003), o que torna a área foliar uma variável chave em estudos fisiológicos envolvendo o crescimento das plantas, interceptação de luz, eficiência fotossintética, evapotranspiração e as respostas aos fertilizantes e irrigação (BLANCO & FOLEGATTI, 2005). Portanto, a área foliar é utilizada como um indicativo de produtividade e pode ser útil para avaliações técnicas culturais, como a densidade de semeadura, irrigação, adubação e aplicação de defensivos (FAVARIN et al., 2002).

Existem duas categorias de métodos para a estimativa da área foliar: métodos diretos e indiretos (FLUMIGNAN et al., 2008). Os métodos diretos, em sua maioria são destrutivos, empregam medidores eletrônicos muito caros e de difícil manutenção, além de exigir a retirada de partes da planta (GODOY et al., 2007). Por outro lado, os métodos indiretos para a estimativa da área foliar são mais simples e rápidos, com o uso de medições não destrutivas, como a medição das dimensões lineares das folhas (comprimento e largura e/ou o produto do comprimento e largura) (GAMIELY, 1991). Logo, a utilização de modelos não destrutivos é uma alternativa precisa, viável e que pode ser repetida ao longo do crescimento e desenvolvimento da planta.

A utilização de recursos computacionais é recomendável para determinar a área foliar real, por possibilitar a análise da área foliar íntegra e também de folhas lesionadas e, consequentemente, da área foliar útil (VIEIRA JUNIOR et al., 2006). Segundo Adami et al. (2008), o método de análise de imagens digitais é preciso e permite a estimativa da área foliar tanto em folíolos danificados quanto íntegros, podendo substituir o método integrador de área foliar (Método Padrão LI-COR®). O processo digital de imagens tem a função de fornecer

ferramentas para facilitar a identificação e a extração de informações contidas nas imagens, para posterior interpretação (PRATT, 1978). Portanto, sistemas de computação são utilizados para atividades interativas de análise, assim como para a manipulação de imagens, especialmente com relação à forma, cor e textura dos objetos que compõem a imagem (GONZALEZ & WINTZ, 1987).

Em diversas culturas agrícolas, como milho (VIEIRA JUNIOR et al., 2006), beterraba (MARROCOS et al., 2010) e aceroleira (LUCENA et al., 2011) o processamento de imagens digitais foi utilizado para a determinação da área foliar real, para posterior geração de modelos matemáticos. Em geral, esses estudos têm apontado uma boa precisão na utilização dessas imagens na predição da área foliar real. As relações existentes entre as dimensões lineares das folhas (comprimento, largura e/ou produto do comprimento vezes largura) e a área total podem ser estudadas por meio da geração de modelos matemáticos que descrevam tais relações. Esses modelos podem ser validados e aplicados nas medições de campo, em diferentes estádios de desenvolvimento e crescimento das plantas, de maneira não destrutiva, com baixo custo de medição e elevada precisão. Modelos matemáticos para estimação de área foliar já foram desenvolvidos em diversas culturas, como em algodoeiro (MONTEIRO et al., 2005), laranja (GODOY et al., 2007), bananeira (ZUCOLOTO et al., 2008), cafeeiro (FLUMIGNAN et al., 2008), girassol (MALDANER et al., 2009), batata (BUSATO et al., 2010), crambe (TOEBE et al., 2010), nabo forrageiro (CARGNELUTTI FILHO et al., 2012), canola (CARGNELUTTI FILHO et al., 2015a) e feijão guandu (CARGNELUTTI FILHO et al., 2015b).

O uso destas equações matemáticas possibilita sucessivas avaliações durante o desenvolvimento de determinada espécie, assim como a execução das medidas a campo (ZUCOLOTO et al., 2008). De acordo com Maldaner et al. (2009), são preferíveis os modelos que utilizam apenas uma das dimensões da folha, como a largura ou o comprimento, reduzindo assim 50% do número de medições a serem realizadas a campo. Em geral, quanto maior for a amplitude do comprimento, da largura e da área foliar das folhas utilizadas na geração de modelos matemáticos, mais ampla será a possibilidade de utilização desses modelos, permitindo sua utilização em folhas pequenas, médias e grandes (CARGNELUTTI FILHO et al., 2012). Como cada espécie apresenta padrões característicos de morfologia foliar, é necessária a geração de modelos específicos de estimação de área foliar por espécie. Ainda, modelos devem ser preferencialmente gerados a partir de dados obtidos de folhas com elevada amplitude de tamanhos, coletadas em diferentes níveis do dossel, épocas de

crescimento e desenvolvimento e sob variadas épocas de semeadura, densidades e condições ambientais, garantindo a representatividade de condições de campo.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse estudo foi gerar modelos para a estimação da área foliar de *Crotalaria juncea* determinada por imagens digitais, em função do comprimento, ou da largura e/ou do produto comprimento vezes largura do limbo foliar.

2.2 Objetivos específicos

- a) Comparar os métodos de determinação das áreas foliares obtidas com o uso do Software Digimizer v.4.5.2[®] e Sigma Scan Pro v.5.0[®];
- b) Identificar dentre os modelos matemáticos do tipo linear, quadrático e potência, quais modelos apresentam a melhor predição da área foliar da *Crotalaria juncea*, em função do comprimento, da largura e do produto do comprimento vezes a largura das folhas;

3 JUSTIFICATIVA

Embora existam informações em relação às características agronômicas da cultura, não foram encontrados estudos acerca da modelagem da área foliar de *Crotalaria juncea*. Ainda, diversos autores utilizam a *C. juncea* em rotação de culturas e adubação verde, visto que a espécie apresenta propriedade e efeitos de interesse agrônomo, como capacidade de incrementar e ciclar nutrientes (N, P, K Ca e Mg), além de atuar no controle de fitonematoides e aumentar a produtividade de outras culturas quando em consórcio ou sucessão. A determinação da área foliar da *C. juncea* utilizando métodos não destrutivos será de grande utilidade para pesquisadores, produtores e acadêmicos, uma vez que permite a quantificação de área foliar, do índice de área foliar e demais variáveis dependentes, que poderão ser utilizadas em estudos de crescimento, desenvolvimento e de produtividade da cultura.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos com a cultura de *Crotalaria juncea*, cultivar IAC-KR1, em épocas de semeadura distintas de 2014/2015, na área experimental da Universidade Federal do Pampa – Campus Itaqui, com latitude de 29°09'S, longitude de 56°33'W e altitude de 74m. O clima da região é do Cfa subtropical úmido, conforme classificação de Köppen e o solo é classificado como Plintossolo Háplico (EMBRAPA, 2013).

A semeadura na primeira época foi realizada no dia 18 de outubro de 2014, sendo realizada adubação de base de 25 kg ha⁻¹ de N, 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 100 kg ha⁻¹ de K₂O. A área útil do experimento foi de 256 m², na qual foram semeadas 27 sementes por metro linear, com espaçamento entre linhas de 0,45 m e um total de 60 sementes por m², com população final avaliada aos 154 dias após a semeadura de 43 plantas por m². A semeadura na segunda época foi realizada no dia 23 janeiro de 2015, em área útil de 48 m² e com mesma adubação de base que na primeira época de semeadura. A semeadura foi realizada a lanço em densidade três vezes superior a primeira época, utilizando-se 9 g de sementes por m², com densidade de 180 sementes por m², com população final avaliada aos 122 dias após a semeadura de 135 plantas por m². Todos os tratamentos culturais foram mantidos constantes entre os experimentos e realizados uniformemente em toda a área experimental, com exceção da densidade de semeadura e do sistema de semeadura (em linha e a lanço) que foram distintos entre os experimentos da primeira e segunda época de semeadura.

Para a determinação da área foliar, foi coletado um total de 4.000 folhas, sendo 2.000 folhas de cada época de semeadura, aleatoriamente, com diferentes tamanhos, a partir do crescimento vegetativo pleno (aproximadamente 60 dias após a semeadura). Na primeira época, foram coletadas 500 folhas aos 59, 82, 102 e 129 dias após a semeadura. Já na segunda época, foram coletadas 500 folhas aos 61, 80, 92 e 104 dias após a semeadura. Em cada folha, mensuraram-se o comprimento (C) e a largura (L) do limbo foliar com régua milimetrada. Em seguida, estimou-se o produto comprimento vezes largura (C×L). Posteriormente, determinou-se a área foliar de cada uma das 4.000 folhas, por meio de imagens digitais. Para isso, as folhas foram colocadas em sequência no scanner da marca EPSON, modelo Perfection V33/V330 e, digitalizadas com resolução de 300 dpi. Depois essas imagens digitais foram processadas com o Software Digimizer v.4.5.2[®] (MEDCALC SOFTWARE, 2015) e Sigma Scan Pro v.5.0[®] (JANDEL SCIENTIFIC, 1991) para as determinações da área foliar e comparações entre as áreas foliares estimadas entre os dois softwares.

De cada coleta, em cada época de semeadura, foram separadas aleatoriamente 400 folhas para geração de modelos e 100 folhas para validação dos modelos. Dessa forma, do total de 4.000 folhas avaliadas (2 épocas de semeadura \times 4 datas de coletas/época \times 500 folhas por coleta), 3.200 folhas (80% das folhas coletadas) foram utilizadas para geração de modelos matemáticos e 800 folhas (20% das folhas coletadas) foram utilizadas apenas para a validação dos modelos gerados. Para os dados do C, da L, do C \times L e área foliar (Y) das folhas de cada época utilizadas para a geração (400 folhas) e validação (100 folhas) dos modelos e para o total de folhas para geração (3.200 folhas) e validação (800 folhas) dos modelos, foram calculados os valores mínimo, máximo, média, mediana, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, erro padrão, assimetria e curtose.

Com base nos dados de C, da L, do C \times L e área foliar (Y) foram construídos histogramas de frequências e gráficos de dispersão. A seguir, foi realizada a modelagem da área foliar real (Y), determinada por processamento de imagem, em função do C ou da L e/ou do C \times L por meio dos modelos: linear ($Y = a + bx$), quadrático ($Y = a + bx + cx^2$) e potência ($Y = ax^b$), com auxílio do aplicativo Microsoft Office Excel (2013). Nesses modelos, x representa a dimensão linear da folha (C, L ou C \times L). Tanto nos modelos lineares quanto nos quadráticos, o intercepto foi igual a zero (coeficiente linear $a = 0$), considerando que quando uma dimensão linear (C, L ou C \times L) assume valor nulo, a área foliar estimada também deverá ser nula (SCHAWB et al., 2014).

A validação é importante para avaliar o desempenho dos modelos em conjunto de dados independentes (não utilizados para geração dos modelos) e pode contribuir na avaliação da acurácia e precisão do modelo. A validação dos nove modelos de estimação da área foliar foi realizada com base nos 800 valores estimados de área foliar pelo modelo (\hat{Y}_i) e os 800 valores observados (Y_i) de área foliar real. Em cada modelo, foi ajustada uma regressão linear simples ($\hat{Y}_i = a + bY_i$) da área foliar estimada pelo modelo (variável dependente) em função da área foliar observada (variável independente). Foram testadas as hipóteses $H_0: a = 0$ versus $H_1: a \neq 0$ e $H_0: b = 1$ versus $H_1: b \neq 1$, por meio do teste t de Student a 5% de probabilidade. A seguir foram calculados os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) e de determinação (R^2) entre \hat{Y}_i e Y_i . Para cada modelo, também foi calculado o erro absoluto médio (EAM) e o índice d de Willmott (WILLMOTT, 1981) conforme indicado por Cargnelutti Filho et al. (2012, 2015a, b).

Para a escolha dos melhores modelos de estimação da área foliar de *Crotalaria juncea*, em função do C, ou da L e/ou do C \times L da folha, foram utilizados os seguintes critérios: coeficiente linear não diferente de zero, coeficiente angular não diferente de um, coeficientes

de correlação linear de Pearson e de determinação mais próximos de um, erro absoluto médio mais próximo de zero e índice *d* de Willmott (1981) mais próximo de um, de acordo com recomendações de Cargnelutti Filho et al. (2012, 2015a, b). As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do Microsoft Office Excel® e do software Statistica 12.0® (STATSOFT, 2015).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas quatro avaliações realizadas em cada época de semeadura, constataram-se valores similares de média e de mediana e apenas pequenos desvios de assimetria e curtose, indicando bom ajuste dos dados à distribuição normal, para todas as variáveis avaliadas em folhas destinadas a geração de modelos (Tabela 1) e também às folhas destinadas a validação desses modelos (Tabela 2). Observou-se elevada amplitude (diferença entre valores mínimo e máximo) para cada variável mensurada ($3,40 \text{ cm} \leq \text{comprimento} \leq 14,20 \text{ cm}$, $0,80 \text{ cm} \leq \text{largura} \leq 3,60 \text{ cm}$, $2,72 \text{ cm}^2 \leq \text{comprimento} \times \text{largura} \leq 47,88 \text{ cm}^2$ e $1,75 \text{ cm}^2 \leq \text{área foliar real} \leq 36,10 \text{ cm}^2$) em folhas utilizadas para geração dos modelos matemáticos de estimação de área foliar (Tabela 1). Nos estudos realizados por Cargnelutti Filho et al. (2012, 2015a, b) e por Toebe et al. (2010, 2012), também ocorreu uma ampla diferença no tamanho das folhas, o que é importante para a geração de modelos aplicáveis a folhas de variados tamanhos.

Em todas as avaliações realizadas para a geração (Tabela 1) e validação (Tabela 2) de modelos, os valores de coeficientes de variação foram superiores para o produto do comprimento \times largura e para a área foliar determinada pelos softwares Digimizer e Sigma Scan Pro, em relação ao CV obtido para comprimento e largura. Pelo coeficiente de variação, pôde-se verificar que os valores de comprimento e largura da folha apresentaram maior homogeneidade quando comparados as demais variáveis analisadas. Nas culturas de nabo forrageiro (CARGNELUTTI FILHO et al., 2012), canola (CARGNELUTTI FILHO et al., 2015a) e feijão guandu (CARGNELUTTI FILHO et al., 2015b) também foi verificado maior variabilidade dos dados em relação ao $C \times L$ e Y quando comparadas as dimensões lineares do comprimento e largura.

A ampla variabilidade do tamanho de folhas, obtido por avaliações espaçadas no tempo, coletas realizadas em diferentes fases do crescimento e desenvolvimento da cultura, dentro de duas épocas de semeadura, considerando distintas regiões dos dosséis das plantas e diferentes densidades de semeadura e sistemas de semeadura contribuem para a geração de modelos de amplo espectro de utilização na cultura. Ainda, o elevado número de folhas

utilizadas para a geração dos modelos ($n = 3.200$ folhas) amplia a segurança na recomendação dos modelos obtidos. Os diagramas de dispersão entre as variáveis independentes (comprimento, largura e comprimento \times largura) e a área foliar real indicam padrões lineares e não lineares de associação (Figura 1A). Observou-se associação não linear entre C e Y, L e Y e, linear entre C \times L e Y. Em função disso, foram gerados e testados modelos lineares e não lineares do tipo potência e quadrático para a estimação da área foliar real em função de cada dimensão linear.

As áreas foliares obtidas pelos softwares Digimizer e Sigma Scan Pro foram coincidentes (Figura 1B e Tabela 1), com elevada correlação ($r = 0,9991$) e excelente predição entre si ($R^2 = 0,9981$), podendo a área foliar obtida pelo software Sigma Scan Pro ser estimada por $1,0063 \times$ área foliar obtida pelo software Digimizer. Dessa forma, para cada 1cm^2 de área foliar determinada pelo software Digimizer existe uma superestimativa de apenas $0,0063\text{cm}^2$, em caso de utilização do software Sigma Scan Pro e vice-versa. Assim, pode-se inferir que os dois softwares resultam em determinações de áreas foliares coincidentes, cabendo ao pesquisador escolher o software a ser utilizado, considerando o custo, a acessibilidade e os demais itens pertinentes à adequada escolha. Nesse estudo, considerando-se as afirmações acima, optou-se por considerar a área foliar real, como sendo a média obtida entre os dois softwares para cada uma das 3.200 folhas utilizadas na geração e 800 folhas utilizadas na validação dos modelos.

Entre os tipos de modelos testados, verificou-se melhor predição para os modelos do tipo potência ($0,8718 \leq R^2 \leq 0,9873$), seguidos pelos modelos do tipo quadrático ($0,8161 \leq R^2 \leq 0,9853$) e do tipo linear ($0,6686 \leq R^2 \leq 0,9849$) (Tabela 3). Entre as variáveis independentes utilizadas para a estimação da área foliar real, melhor predição é obtida utilizando modelos com base no comprimento \times largura ($0,9849 \leq R^2 \leq 0,9873$), seguidos por modelos com base na largura ($0,7713 \leq R^2 \leq 0,8718$) ou apenas no comprimento da folha ($0,6686 \leq R^2 \leq 0,8721$). Destaca-se que tanto os modelos lineares quanto os quadráticos utilizados nesse estudo foram gerados definindo a intersecção (passagem pela origem), considerando que quando a dimensão linear da folha for zero, a área foliar estimada pelo modelo também deverá ser zero. Segundo Schawb et al. (2014), esse procedimento é mais adequado do ponto de vista biológico.

Os modelos tipo potência apresentaram os melhores ajustes para a estimação da área foliar em função do C ($R^2 = 0,8721$) e L ($R^2 = 0,8718$), quando comparados aos modelos quadrático e linear (Tabela 3). Em espécies agrícolas como feijão guandu (CARGNELUTTI FILHO et al., 2015b), girassol (AQUINO et al., 2011), gladiolo (SCHAWB et al., 2014) e

feijão-vagem (TOEBE et al., 2012), o modelo potência também foi mais adequado para estimação da área foliar baseada em apenas uma das dimensões lineares, concordando com os resultados obtidos neste trabalho. Com base no C×L, os três modelos de estimação da área foliar (linear, quadrático e potência) apresentaram ajustes semelhantes. Assim, os modelos linear ($\hat{Y} = 0,7390x$ e $R^2 = 0,9849$), quadrático ($\hat{Y} = 0,7566x - 0,0007x^2$ e $R^2 = 0,9853$) e potência ($\hat{Y} = 0,7665x^{0,9889}$ e $R^2 = 0,9873$) da área foliar (Y) em função do produto comprimento×largura (x) são os mais recomendados para estimação da área foliar de *Crotalaria juncea*.

Na validação dos modelos utilizando as 800 folhas separadas aleatoriamente, o modelo tipo potência apresentou o melhor ajuste para a estimação da área foliar em função do comprimento ou da largura, com coeficientes lineares mais próximos a zero, coeficientes angulares mais próximos a um, maiores escores de coeficientes de correlação, de determinação e do índice d de Willmott, bem como menor erro absoluto médio em relação aos modelos quadráticos e linear (Tabela 3). No entanto, os coeficientes angulares diferiram de um e os coeficientes lineares diferiram de zero entre os 800 valores estimados de área foliar pelos modelos e os 800 valores observados de área foliar real, indicando que esses modelos do tipo potência com base em uma única dimensão não são adequados para a estimação da área foliar, mesmo tendo sido superiores aos modelos linear e quadrático.

Os modelos de estimação de área foliar a partir da medição do comprimento × largura apresentaram ajustes superiores, confirmados na validação (Tabela 3). Assim, o erro absoluto médio ($0,494 \leq EAM \leq 0,508$) da validação dos modelos baseado no C×L é menor do que a utilização de somente a L ou C, indicando que a estimativa da área foliar é mais precisa com o uso do C×L. Logo, os três modelos gerados a partir de C×L apresentaram maiores valores de coeficientes de correlação de Pearson, de determinação e índice d de Willmott mais próximo a um (Tabela 3). Entre os três modelos gerados com base no C×L, o modelo que mais se destacou foi o do tipo linear ($\hat{Y} = 0,7390x$ e $R^2 = 0,9849$), uma vez que seu coeficiente linear não diferiu de zero ($a = -0,032^{ns}$) e o coeficiente angular ($b = 0,991^{ns}$) não se diferenciou de um. Isso quer dizer que caso o valor de área foliar real seja zero, o valor estimado de área foliar também será próximo a zero ($a = -0,032^{ns}$) e a medida em que a área foliar real aumente uma unidade, a área foliar estimada pelo modelo também aumentará aproximadamente uma unidade ($b = 0,991^{ns}$).

Para *Crotalaria juncea* devem ser realizadas as medições das duas dimensões lineares (comprimento e largura) com posterior multiplicação dessas dimensões (C×L) para melhor estimação da área foliar real. Em outras culturas como batata (BUSATO et al., 2010), crambe

(TOEBE et al., 2010) e feijão caupi (LIMA et al., 2008) as medições realizadas com as duas dimensões lineares também apresentaram melhor adequação na estimação da área foliar, assim como no presente estudo. De acordo com Cargnelutti Filho et al. (2015a), o modelo linear baseado no C×L deve ser adotado pela simplicidade e aplicabilidade do modelo em relação ao quadrático e potência. Monteiro et al. (2005) testando os métodos das dimensões (C×L) e da massa seca do algodoeiro, concluiu que a área foliar do algodoeiro pode ser estimada com boa exatidão e excelente precisão a partir da medida das dimensões de suas folhas.

As áreas foliares real (Y) e estimadas pelo modelo linear $\hat{Y} = 0,7390x$ ($R^2 = 0,9849$) entre as 800 folhas da validação apresentaram relação linear (Figura 2A). Segundo Antunes et al. (2008) e Pompelli et al. (2012), mesmo que modelos gerados com uma dimensão linear apresentem bons ajustes, em geral estes modelos apresentam estimativas viesadas, em especial nos casos de folhas pequenas e grandes, com erros não se ajustando à distribuição normal. No presente estudo, verificou-se que a utilização do modelo linear de estimação da área foliar (Y) em função do produto C×L apresentou resíduos bem distribuídos, sem tendências viesadas em folhas pequenas e grandes (Figura 2B). Assim, por apresentar coeficiente linear não diferente de zero, coeficiente angular não diferindo de um, elevados coeficientes de correlação e de determinação e ainda baixo valor de erro absoluto médio e elevado valor de *d* de Willmott e resíduos bem distribuídos, recomenda-se a utilização do modelo $\hat{Y} = 0,7390x$ da área foliar real (\hat{Y}) em função do produto do comprimento vezes a largura (x) para a estimação da área foliar real de *Crotalaria juncea*.

6 CONCLUSÕES

A área foliar estimada pelo software Digimizer apresentou uma excelente predição junto ao software Sigma Scan Pro ($R^2 = 0,9981$). Para cada 1 cm² de área foliar determinada pelo software Digimizer existe uma superestimativa de apenas 0,0063 cm², em caso de utilização do software Sigma Scan Pro. Portanto, fica a critério do pesquisador escolher qual software utilizar para a determinação da área foliar real por processamento de imagens digitais.

Em *Crotalaria juncea*, os modelos de estimação de área foliar em função do produto comprimento vezes largura apresentam ajustes superiores aos obtidos com base na avaliação de apenas uma dimensão linear (comprimento ou largura), independentemente do tipo de modelo considerado (potência, quadrático ou linear).

O modelo linear $\hat{Y} = 0,7390x$ ($R^2=0,9849$) da área foliar real (\hat{Y}) em função do produto do comprimento vezes a largura (x) é adequado para a estimação da área foliar de *Crotalaria juncea*, atendendo a todos os critérios de validação empregados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES, W. C.; POMPELLI, M. F.; CARRETERO, D. M.; DAMATTA, F. M. Allometric models for non-destructive leaf area estimation in coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*). **Annals of Applied Biology**, v.153, p.33-40, 2008.
- AQUINO, L. A.; SANTOS JÚNIOR, V. C.; GUERRA, J. V. S.; COSTA, M. M. Estimativa da área foliar do girassol por método não destrutivo. **Bragantia**, v.70, p.832-836, 2011.
- ASNER, G. P.; SCURLOCK, J. M. O.; HICKE, J. A. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. **Global Ecology and Biogeography**, v.12, p.191-205, 2003.
- ADAMI, M.; HASTENREITER, F. A.; FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. Estimativa de área de folíolos de soja usando imagens digitais e dimensões foliares. **Bragantia**, v.67, p.1053-1058, 2008.
- AMBROSANO, E. J.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMASS, E. A.; GUIRADO, N.; ROSSI, F.; MENDES, P. C. D. MURAOKA, T. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. **Scientia Agricola**, v.62, p.534-542, 2005.
- BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V. Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. **Scientia Agricola**, v.62, p.305-309, 2005.
- 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**, v.41, p.702-708, 2010.
- EMBRAPA. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília, 2014. 507p.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2013. 353p.
- 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**, v.71, p.47-51, 2012.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; TOEBE, M.; ALVES, B. M.; BURIN, C.; KLEINPAUL, J. A. Estimação da área foliar de canola por dimensões foliares. **Bragantia**, v.74, p.139-148, 2015.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; TOEBE, M.; ALVES, B. M.; BURIN, C. Estimação da área foliar de feijão guandu por dimensões. **Ciência Rural**, v.45, p.1-8, 2015.
- FAVARIN, J.L.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A.G.; NOVA, N.A.V.; FAVARIN, M.G.G.V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.769-773, 2002.
- FLUMIGNAN, D. L.; ADAMI, M.; FARIA, R. T. Área foliar de folhas íntegras e danificadas de cafeeiro determinada por dimensões foliares e imagem digital. **Coffee Science**, v. 3, p. 1-6, 2008.
- FONTANÉTTI, A.; CARVALHO, G. J.; GOMES, L. A. A.; ALMEIDA, K.; MORAES, S. R. G.; TEIXEIRA, C. M. Adubação verde na produção orgânica de alface americana e repolho. **Horticultura Brasileira**, v.24, p.146-150, 2006.
- FONSECA, C. E. L.; CONDÉ, R. C. C. Estimativa da área foliar em mudas de mangabeira (*Hancornia speciosa* Gom.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, p.593-599, 1994.
- GAMIELY, S.; RANDEL, W. M.; MILLS, H. A.; SMITTLE, D. A. A rapid and nondestructive method for estimating leaf area of onions. **HortScience**, v.26, p.206, 1991.

- GARRIDO, M. S.; SOARES, A. C. F.; COIMBRA, J. L.; SOUSA, C. S. Management of crotalaria and pigeon pea for control of yam nematode diseases. **Summa Phytopathologica**, v.34, p.222-227, 2008.
- GODOY, L. J. G.; YANAGIWARA, R. S.; VILLAS BÔAS, R. L. V.; BACKES, C.; LIMA, C. P. Análise da imagem digital para estimativa da área foliar em plantas de laranja “Pêra”. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.29, p.420-424, 2007. GONZALEZ, R. C.; WINTZ P. A. **Digital image processing**. Reading: Addison-Wesley, p.431, 1987.
- GONZALEZ, R. C.; WINTZ, P. A. **Digital image processing**. Reading: Addison-Wesley, 1987. 431p.
- INOMOTO, M. M; ANTEDOMÊNICO, S. R; SANTOS, V. P; SILVA, R. A; ALMEIDA, G. C. Avaliação em casa de vegetação do uso de sorgo, milho e crotalaria no manejo de *Meloidogyne javanica*. **Tropical Plant Pathology**, v.33, p.125-129, 2008.
- JANDEL SCIENTIFIC. **User’s manual**. California, 1991. 280p.
- LEAL, M. A. A.; GUERRA, J. G.; PEIXOTO, R. T. G.; ALMEIDA, D. L. Desempenho de crotalaria cultivada em diferentes épocas de semeadura e de corte. **Revista Ceres**, v.59, p.386-391, 2012.
- LIMA, C. J. G. S.; OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; OLIVEIRA, M. K. T.; OLIVEIRA FILHO, A. F. Modelos matemáticos para estimativa da área foliar de feijão caupi. **Revista Caatinga**, v.21, p.120-127, 2008.
- LUCENA, R. R. M.; BATISTA, T. M. V.; DOMBROSKI, J. L. D.; LOPES, W. A. R.; RODRIGUES, G. S. O. Medição de área foliar de aceroleira. **Revista Caatinga**, v.24, p.40-45, 2011.
- MAGALHÃES, A. C. N. Análise quantitativa de crescimento. In: FERRI, M.G. **Fisiologia vegetal**. São Paulo: EDUSP, v.1, p.331-350, 1986.
- 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**, v.39, p.1356-1361, 2009.
- MARROCOS, S. T. P.; DANTAS, M. S. M.; DOMBROSKI, J. L. D.; LUCENA, R. R. M.; BATISTA, T. M. V. Análise comparativa de métodos de estimativa de área foliar em beterraba. **Revista Verde**, v.5, p.140-146, 2010.
- MEDCALC SOFTWARE. **Digimizer image analysis software manual**. Belgium, 2015.
- MONTEIRO, J. E. B. A.; SENTELHAS, P. C.; CHIAVEGATO, E. J.; GUISELINI, C.; SANTIAGO, A. V.; PRELA, A. Estimção da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas. **Bragantia**, v.64, p.15-24, 2005.
- MORAES, S.R.G.; CAMPOS, V.P.; POZZA, E.A.; FONTANÉTTI, A.; CARVALHO, G.J.; MAXIMINIANO, C. Influência de leguminosas no controle de fitonematóides no cultivo orgânico de alface-americana e de repolho. **Fitopatologia Brasileira**, v.31, p.188-191, 2006.
- PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J. G. M.; CECON, P. R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.35-40, 2004.
- POMPELLI, M. F.; ANTUNES, W. C.; FERREIRA, D. T. R. G.; CAVALCANTE, P. G. S.; WANDERLEY-FILHO, H. C. L.; ENDRES, L. Allometric models for non-destructive leaf area estimation of *Jatropha curcas*. **Biomass and Bioenergy**, v.36, p.77-85, 2012.
- PRATT, W.K. **Digital image processing**. New York: J. Wiley, 1978. 750p.
- SCHWAB, N. T.; STRECK, N. A.; REHBEIN, A.; RIBEIRO, B. S. M. R.; ULHMANN, L. O.; LANGNER, J. A.; BECKER, C. C. Dimensões lineares da folha e seu uso na determinação do perfil vertical foliar de gladiolo. **Bragantia**, v.73, p.97-105, 2014.

SILVA, T. O.; MENEZES, R. S. C. Adubação orgânica da batata com esterco e/ou *Crotalaria juncea*. II. Disponibilidade de N, P e K no solo ao longo do ciclo de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.51-61, 2007.

STATSOFT. **Statistica 12.0 Software**. Tucksas: USA, 2015.

TOEBE, M.; BRUM, B.; LOPES, S. J.; CARGNELUTTI FILHO, A.; SILVEIRA, T. S. Estimativa da área foliar de *Crambe abyssinica* por discos foliares e por fotos digitais. **Ciência Rural**, v.40, p.475-478, 2010.

TOEBE, M.; CARGNELUTTI FILHO, A.; LOOSE, L. H.; HELDWEIN, A. B.; ZANON, A. J. Área foliar de feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) em função de dimensões foliares. **Semina: Ciências Agrárias**, v.33, p.2491-2500, 2012.

ZUCOLOTO, M; LIMA, J. S. S; COELHO, R. I. Modelo matemático para estimativa da área foliar total de bananeira 'Prata- Anã'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.30, p.1152-1154, 2008.

VALENZUELA, H; SMITH, J. 'Tropic sun' sunnhemp. Hawaii: Cooperative Extension Service, College of Tropical Agriculture and Human Resources. 3p. 2002. (Sustainable Agriculture Green Manure Crops, August 2002, SA-GM-11).

VIEIRA JÚNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D.; CICERO, S. M.; CASTRO JORGE, L. A.; MANFRON, P. A.; MARTIN, T. N. Estimativa da área foliar em milho através de análise de imagens. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.5, p.58-66, 2006.

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

Tabela 1. Número de folhas (n), mínimo, máximo, média, mediana, variância, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), erro padrão (EP), assimetria e curtose para variáveis avaliadas em 3.200 folhas de *Crotalaria juncea* – mensuração de 400 folhas por avaliação em cada época de semeadura - utilizadas para a geração dos modelos de estimação da área foliar em função de dimensões lineares, na safra 2014/15, em Itaqui - RS - Brasil.

Variável (unidade de medida)	n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Variância	DP	CV	EP	Assimetria	Curtose
Época de semeadura 1 - Primeira avaliação - 59 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	400	4,80	14,20	9,73	9,50	3,93	1,98	20,37	0,10	0,06	-0,78
Largura (cm)	400	0,90	3,60	2,44	2,40	0,35	0,59	24,32	0,03	-0,02	-0,75
Comprimento × Largura (cm ²)	400	4,32	47,88	24,76	22,69	107,35	10,36	41,85	0,52	0,37	-0,88
Área Foliar – Digimizer (cm ²)	400	3,53	36,69	18,47	16,72	59,82	7,73	41,87	0,39	0,34	-0,92
Área Foliar - Sigma Scan Pro (cm ²)	400	3,53	35,51	18,29	16,56	58,27	7,63	41,74	0,38	0,34	-0,89
Área Foliar Real (cm ²)	400	3,53	36,10	18,38	16,63	59,01	7,68	41,79	0,38	0,34	-0,91
Época de semeadura 1 - Segunda avaliação - 82 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	400	3,40	13,40	9,16	9,40	2,67	1,63	17,85	0,08	-0,47	0,32
Largura (cm)	400	0,80	3,40	2,30	2,30	0,30	0,55	23,88	0,03	-0,23	-0,69
Comprimento × Largura (cm ²)	400	2,72	44,22	21,82	22,08	65,14	8,07	36,98	0,40	0,05	-0,61
Área Foliar – Digimizer (cm ²)	400	1,74	31,84	16,08	16,40	35,97	6,00	37,30	0,30	-0,04	-0,69
Área Foliar - Sigma Scan Pro (cm ²)	400	1,75	31,74	16,10	16,27	35,88	5,99	37,21	0,30	-0,05	-0,71
Área Foliar Real (cm ²)	400	1,75	31,79	16,09	16,31	35,92	5,99	37,25	0,30	-0,05	-0,70
Época de semeadura 1 - Terceira avaliação - 102 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	400	4,90	13,60	9,43	9,40	2,08	1,44	15,28	0,07	0,15	0,54
Largura (cm)	400	0,90	2,90	1,94	2,00	0,14	0,37	19,27	0,02	-0,35	-0,03
Comprimento × Largura (cm ²)	400	4,68	36,54	18,58	18,54	29,68	5,45	29,33	0,27	0,06	-0,05
Área Foliar – Digimizer (cm ²)	400	3,06	25,96	13,71	13,66	15,72	3,96	28,91	0,20	0,00	-0,06
Área Foliar - Sigma Scan Pro (cm ²)	400	3,12	26,44	13,91	13,89	16,09	4,01	28,84	0,20	0,00	-0,03
Área Foliar Real (cm ²)	400	3,09	26,20	13,81	13,77	15,90	3,99	28,87	0,20	0,00	-0,05
Época de semeadura 1 - Quarta avaliação - 129 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	400	5,70	14,60	10,54	10,60	2,27	1,51	14,29	0,08	-0,05	-0,21
Largura (cm)	400	0,90	2,80	1,96	2,00	0,08	0,28	14,07	0,01	-0,28	0,54
Comprimento × Largura (cm ²)	400	5,13	40,88	20,92	20,17	29,36	5,42	25,90	0,27	0,36	0,41
Área Foliar – Digimizer (cm ²)	400	4,01	31,85	15,91	15,35	16,42	4,05	25,47	0,20	0,44	0,74
Área Foliar - Sigma Scan Pro (cm ²)	400	4,01	32,45	16,22	15,69	17,08	4,13	25,47	0,21	0,42	0,73
Área Foliar Real (cm ²)	400	4,01	32,15	16,07	15,56	16,74	4,09	25,47	0,20	0,43	0,73
Época de semeadura 2 - Primeira avaliação - 61 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	400	5,40	14,20	10,03	10,10	2,37	1,54	15,35	0,08	-0,08	-0,13
Largura (cm)	400	1,40	3,50	2,37	2,40	0,16	0,40	16,79	0,02	-0,02	-0,27
Comprimento × Largura (cm ²)	400	7,56	45,44	24,19	23,76	49,46	7,03	29,07	0,35	0,26	-0,35
Área Foliar – Digimizer (cm ²)	400	5,44	31,43	17,55	17,15	26,65	5,16	29,42	0,26	0,26	-0,39
Área Foliar - Sigma Scan Pro (cm ²)	400	5,53	32,00	17,79	17,39	27,46	5,24	29,46	0,26	0,26	-0,38
Área Foliar Real (cm ²)	400	5,49	31,66	17,67	17,27	27,05	5,20	29,44	0,26	0,26	-0,39
Época de semeadura 2 - Segunda avaliação - 80 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	400	4,80	13,40	9,30	9,40	2,64	1,63	17,47	0,08	-0,24	-0,06
Largura (cm)	400	1,00	3,50	2,25	2,20	0,29	0,53	23,81	0,03	0,03	-0,36
Comprimento × Largura (cm ²)	400	4,80	44,22	21,68	21,34	70,60	8,40	38,76	0,42	0,42	-0,08
Área Foliar – Digimizer (cm ²)	400	3,46	32,22	16,10	15,95	35,18	5,93	36,85	0,30	0,37	-0,03
Área Foliar - Sigma Scan Pro (cm ²)	400	3,55	32,71	16,23	16,04	35,76	5,98	36,85	0,30	0,38	-0,03
Área Foliar Real (cm ²)	400	3,51	32,47	16,16	16,01	35,46	5,95	36,84	0,30	0,37	-0,03
Época de semeadura 2 - Terceira avaliação - 92 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	400	3,40	12,80	8,56	8,60	3,45	1,86	21,70	0,09	-0,11	-0,42
Largura (cm)	400	0,80	3,00	2,01	2,10	0,22	0,47	23,21	0,02	-0,42	-0,68
Comprimento × Largura (cm ²)	400	2,72	36,25	17,96	18,37	50,72	7,12	39,66	0,36	0,04	-0,69
Área Foliar – Digimizer (cm ²)	400	2,08	26,77	13,05	13,33	25,67	5,07	38,82	0,25	0,03	-0,61
Área Foliar - Sigma Scan Pro (cm ²)	400	2,11	27,22	13,29	13,62	26,40	5,14	38,67	0,26	0,02	-0,61
Área Foliar Real (cm ²)	400	2,10	27,00	13,17	13,44	26,03	5,10	38,74	0,26	0,03	-0,61
Época de semeadura 2 - Quarta avaliação - 104 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	400	3,70	13,40	8,52	8,40	4,20	2,05	24,05	0,10	0,04	-0,82
Largura (cm)	400	0,90	3,30	2,04	2,10	0,33	0,57	28,00	0,03	-0,05	-0,94
Comprimento × Largura (cm ²)	400	3,60	44,22	18,38	17,97	76,09	8,72	47,45	0,44	0,33	-0,75
Área Foliar – Digimizer (cm ²)	400	2,57	31,96	13,36	13,13	39,08	6,25	46,81	0,31	0,32	-0,74
Área Foliar - Sigma Scan Pro (cm ²)	400	2,57	31,76	13,32	13,07	38,56	6,21	46,64	0,31	0,31	-0,75
Área Foliar Real (cm ²)	400	2,57	31,86	13,34	13,12	38,82	6,23	46,72	0,31	0,31	-0,75
Total de folhas utilizadas para a geração dos modelos de estimação de área foliar											
Comprimento (cm)	3.200	3,40	14,60	9,41	9,50	3,36	1,83	19,49	0,03	-0,19	-0,14
Largura (cm)	3.200	0,80	3,60	2,16	2,20	0,27	0,52	23,85	0,01	0,11	-0,21
Comprimento × Largura (cm ²)	3.200	2,72	47,88	21,04	20,37	65,60	8,10	38,50	0,14	0,41	0,04
Área Foliar – Digimizer (cm ²)	3.200	1,74	36,69	15,53	15,08	35,20	5,93	38,21	0,10	0,40	0,09
Área Foliar - Sigma Scan Pro (cm ²)	3.200	1,75	35,51	15,64	15,25	35,18	5,93	37,92	0,10	0,36	0,02
Área Foliar Real (cm ²)	3.200	1,75	36,10	15,59	15,14	35,17	5,93	38,05	0,10	0,38	0,05

Tabela 2. Número de folhas (n), mínimo, máximo, média, mediana, variância, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), erro padrão (EP), assimetria e curtose para variáveis avaliadas em 800 folhas de *Crotalaria juncea* – mensuração de 100 folhas por avaliação em cada época de semeadura - utilizadas apenas para a validação dos modelos de estimação da área foliar em função de dimensões lineares, na safra 2014/15, em Itaqui - RS - Brasil.

Variável (unidade de medida)	n	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Variância	DP	CV	EP	Assimetria	Curtose
Época de semeadura 1 - Primeira avaliação - 59 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	100	5,90	13,40	9,83	9,75	2,80	1,67	17,04	0,17	0,06	-0,42
Largura (cm)	100	1,30	3,20	2,17	2,15	0,19	0,43	19,97	0,04	0,13	-0,29
Comprimento × Largura (cm ²)	100	7,67	40,20	21,92	19,68	58,28	7,63	34,83	0,76	0,55	-0,17
Área Foliar Real (cm ²)	100	5,35	30,93	16,38	14,92	33,49	5,79	35,34	0,58	0,65	0,00
Época de semeadura 1 - Segunda avaliação - 82 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	100	5,10	12,90	9,45	9,65	3,09	1,76	18,62	0,18	-0,55	-0,13
Largura (cm)	100	1,00	3,10	2,06	2,20	0,23	0,48	23,41	0,05	-0,42	-0,77
Comprimento × Largura (cm ²)	100	5,80	37,82	20,20	21,40	56,23	7,50	37,13	0,75	-0,22	-0,84
Área Foliar Real (cm ²)	100	3,84	26,17	14,98	15,78	32,26	5,68	37,91	0,57	-0,25	-0,82
Época de semeadura 1 - Terceira avaliação - 102 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	100	6,20	11,20	8,82	9,00	1,63	1,28	14,48	0,13	-0,02	-0,85
Largura (cm)	100	1,10	2,50	1,72	1,70	0,10	0,31	18,26	0,03	0,04	-0,47
Comprimento × Largura (cm ²)	100	6,82	26,25	15,44	15,35	19,67	4,44	28,73	0,44	0,13	-0,71
Área Foliar Real (cm ²)	100	6,00	20,86	11,78	11,81	11,65	3,41	28,98	0,34	0,23	-0,68
Época de semeadura 1 - Quarta avaliação - 129 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	100	6,60	13,00	9,98	10,05	1,70	1,30	13,07	0,13	-0,20	-0,31
Largura (cm)	100	1,10	2,40	1,84	1,80	0,07	0,27	14,82	0,03	-0,23	-0,05
Comprimento × Largura (cm ²)	100	7,26	30,00	18,65	18,63	22,26	4,72	25,29	0,47	0,06	-0,34
Área Foliar Real (cm ²)	100	5,52	21,72	14,10	14,13	11,59	3,40	24,14	0,34	0,00	-0,29
Época de semeadura 2 - Primeira avaliação - 61 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	100	6,20	12,40	9,09	9,00	1,93	1,39	15,29	0,14	0,24	-0,54
Largura (cm)	100	1,30	3,20	2,25	2,20	0,18	0,42	18,63	0,04	0,13	-0,38
Comprimento × Largura (cm ²)	100	8,19	39,68	20,89	19,45	44,08	6,64	31,79	0,66	0,60	-0,27
Área Foliar Real (cm ²)	100	6,74	28,22	15,30	14,19	23,22	4,82	31,49	0,48	0,67	-0,13
Época de semeadura 2 - Segunda avaliação - 80 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	100	5,30	11,10	8,38	8,30	1,84	1,36	16,18	0,14	0,04	-0,70
Largura (cm)	100	1,10	2,70	1,85	1,80	0,10	0,31	16,95	0,03	0,04	-0,29
Comprimento × Largura (cm ²)	100	7,42	26,19	15,59	14,82	15,91	3,99	25,59	0,40	0,22	-0,37
Área Foliar Real (cm ²)	100	5,85	20,07	11,98	11,66	8,24	2,87	23,95	0,29	0,19	-0,31
Época de semeadura 2 - Terceira avaliação - 92 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	100	4,00	11,60	8,92	9,30	2,23	1,49	16,75	0,15	-1,11	1,15
Largura (cm)	100	0,80	2,50	1,81	1,90	0,13	0,36	20,02	0,04	-0,77	0,08
Comprimento × Largura (cm ²)	100	3,20	29,00	16,63	17,84	28,42	5,33	32,07	0,53	-0,56	-0,21
Área Foliar Real (cm ²)	100	2,46	21,46	12,29	13,14	15,41	3,93	31,95	0,39	-0,58	-0,12
Época de semeadura 2 - Quarta avaliação - 104 dias após semeadura											
Comprimento (cm)	100	5,50	10,70	8,52	8,70	1,70	1,30	15,31	0,13	-0,44	-0,66
Largura (cm)	100	0,90	3,00	1,90	1,90	0,20	0,45	23,81	0,05	-0,08	-0,62
Comprimento × Largura (cm ²)	100	4,95	31,80	16,64	16,16	34,54	5,88	35,32	0,59	0,16	-0,51
Área Foliar Real (cm ²)	100	3,90	22,74	12,18	11,88	18,26	4,27	35,09	0,43	0,13	-0,60
Total de folhas utilizadas apenas na validação dos modelos de estimação de área foliar											
Comprimento (cm)	800	4,00	13,40	9,12	9,20	2,40	1,55	16,97	0,05	-0,12	-0,11
Largura (cm)	800	0,80	3,20	1,95	2,00	0,18	0,42	21,76	0,02	0,16	-0,05
Comprimento × Largura (cm ²)	800	3,20	40,20	18,24	18,00	40,20	6,34	34,75	0,22	0,53	0,44
Área Foliar Real (cm ²)	800	2,46	30,93	13,62	13,44	21,90	4,68	34,35	0,17	0,54	0,65

Tabela 3. Modelos do tipo potência, quadrático e linear para a determinação da área foliar real (Y) - utilizando o comprimento, a largura e/ou o produto comprimento vezes largura como variáveis independentes (x) – e, coeficiente de determinação (R^2) de cada modelo, com base em 3.200 folhas de *Crotalaria juncea*. Validação dos nove modelos com base nos indicadores: coeficientes linear (a), angular (b), de correlação linear de Pearson (r) e de determinação (R^2), erro absoluto médio (EAM) e índice d de Willmott (d), calculados com base nas áreas foliares observadas e estimadas de 800 folhas de *Crotalaria juncea*, na safra 2014/15, em Itaqui - RS - Brasil.

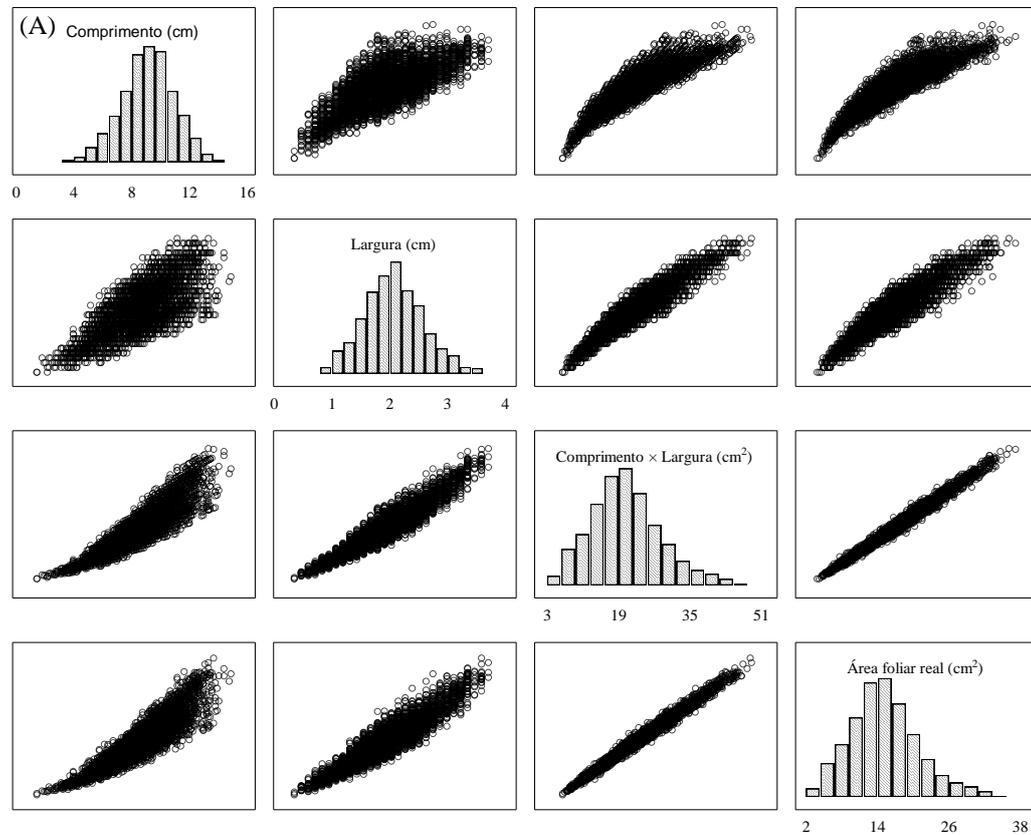
Modelos gerados com 3.200 folhas avaliadas em quatro avaliações por época de semeadura							
Tipo	Variável independente (x)	Modelo					R^2
1) Potência	Comprimento	$\hat{Y} = 0,1980x^{1,9284}$					0,8721
2) Potência	Largura	$\hat{Y} = 4,3940x^{1,5964}$					0,8718
3) Potência	Comprimento \times Largura	$\hat{Y} = 0,7665x^{0,9889}$					0,9873
4) Quadrático	Comprimento	$\hat{Y} = 0,2942x + 0,1397x^2$					0,8161
5) Quadrático	Largura	$\hat{Y} = 3,6776x + 1,5479x^2$					0,8551
6) Quadrático	Comprimento \times Largura	$\hat{Y} = 0,7566x - 0,0007x^2$					0,9853
7) Linear	Comprimento	$\hat{Y} = 1,7027x$					0,6686
8) Linear	Largura	$\hat{Y} = 7,3902x$					0,7713
9) Linear	Comprimento \times Largura	$\hat{Y} = 0,7390x$					0,9849
Validação dos modelos com 800 folhas avaliadas em quatro avaliações por época de semeadura							
Tipo de modelo	Variável independente (x)	a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	r ⁽³⁾	R^2	EAM	d
1) Potência	Comprimento	2,467*	0,877*	0,896*	0,804	1,851	0,939
2) Potência	Largura	1,167*	0,872*	0,912*	0,833	1,577	0,950
3) Potência	Comprimento \times Largura	0,113 ^{ns}	0,984*	0,990*	0,982	0,497	0,995
4) Quadrático	Comprimento	3,198*	0,840*	0,896*	0,804	1,919	0,933
5) Quadrático	Largura	2,216*	0,816*	0,912*	0,833	1,520	0,951
6) Quadrático	Comprimento \times Largura	0,199*	0,980*	0,990*	0,982	0,494	0,995
7) Linear	Comprimento	8,702*	0,501*	0,890*	0,793	2,739	0,815
8) Linear	Largura	6,096*	0,610*	0,910*	0,830	1,888	0,906
9) Linear	Comprimento \times Largura	-0,032 ^{ns}	0,991 ^{ns}	0,990*	0,982	0,508	0,995

⁽¹⁾ * Coeficiente linear difere de zero, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não-significativo. ⁽²⁾ *

Coeficiente angular difere de um, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não-significativo. ⁽³⁾ *

Coeficiente de correlação difere de zero, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não-significativo.

Figura 1. (A) Matriz com histograma de frequência (na diagonal) e gráficos de dispersão entre comprimento (em cm), largura (em cm), produto comprimento vezes largura (em cm^2) e a área foliar real (em cm^2) de 3.200 folhas de *Crotalaria juncea*. (B) Relação entre a área foliar determinada pelo software Digimizer e a área foliar determinada pelo software Sigma Scan Pro, em 3.200 folhas de *Crotalaria juncea*.



(B) Área Foliar - Sigma Scan Pro = $1,0063 \cdot \text{Área Foliar - Digimizer}$; $r=0,9991$; $R^2=0,9981$

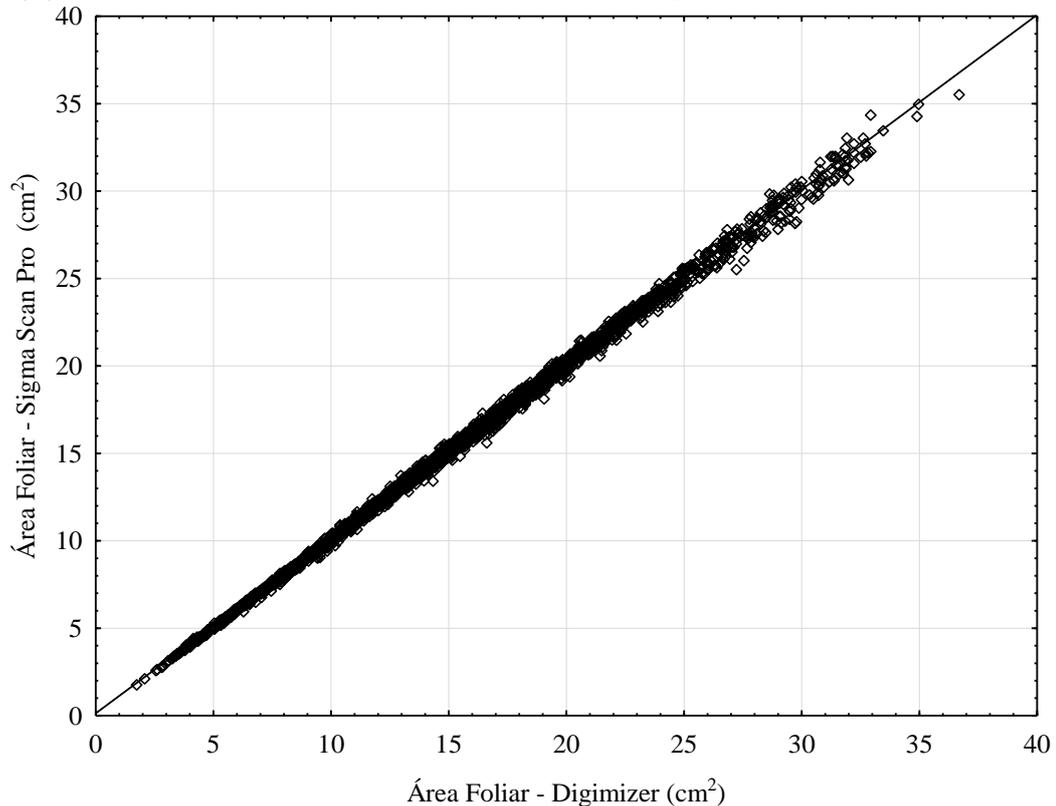


Figura 2. (A) Relação entre a área foliar real e a área foliar estimada pelo modelo linear $\hat{Y} = 0,7390x$ ($R^2 = 0,9849$), em 800 folhas de *Crotalaria juncea* utilizadas na validação, sendo x o produto do comprimento \times largura de cada folha. (B) Resíduo do modelo - valor estimado menos valor real da área foliar - para cada uma das 800 folhas de *Crotalaria juncea* utilizadas na validação do modelo.

