

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**ESTIMATIVA DE ÁREA FOLIAR NA CULTURA DA SOJA USANDO OS
MÉTODOS DE DIMENSÕES FOLIARES E IMAGENS DIGITAIS**

FABIANA FRANCHINI CURTT

UBERLÂNDIA – MG
NOVEMBRO – 2019

FABIANA FRANCHINI CURTT

**ESTIMATIVA DE ÁREA FOLIAR NA CULTURA DA SOJA USANDO OS
MÉTODOS DE DIMENSÕES FOLIARES E IMAGENS DIGITAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Agrônoma da Universidade
Federal de Uberlândia para obtenção do grau
de Engenheira Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Ricardo da Silva

UBERLÂNDIA – MG

NOVEMBRO - 2019

RESUMO

CURTT, Fabiana Franchini. **Estimativa de área foliar na cultura da soja usando os métodos de dimensões foliares e imagens digitais**. 2019. 32p. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC (Curso de Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia.¹

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é a principal planta cultivada no Brasil. Sua produção esperada na safra 2018/2019 é de 115 milhões de toneladas referente a 36 milhões de hectares cultivados. Para acompanhar o crescimento das plantas no campo e estimar a produção ou as perdas decorrentes dos estímulos ou estresses acometidos à cultura, faz-se necessário o uso de parâmetros, como o índice de área foliar (IAF), dado pelo quociente entre a área foliar (AF) e a área de solo por ela ocupada. O IAF está diretamente relacionado à produtividade que, por sua vez, depende da acurácia do computo/estimativa da AF. Os métodos para computar/estimar a AF podem se dividir em destrutivos e não-destrutivos; para a cultura da soja, inúmeros trabalhos foram desenvolvidos utilizando estes dois tipos de métodos. O método do integralizador digital (LI-COR) e o método de dimensões foliares, por exemplo, são os mais utilizados. O método LI-COR é utilizado como referência, por sua alta acurácia. Contudo, o software QUANT, que estima a área foliar a partir de imagens digitalizadas, pode ser uma opção viável na substituição do LI-COR, por seu menor custo. Portanto, o objetivo deste trabalho foi comparar a acurácia dos métodos de dimensões foliares corrigidas (DFc) e imagens digitais processadas pelo software QUANT com o método LI-COR (padrão). Para isso, plantas de sojas dos cultivares UFUS-6901 e BRASMÁX Flecha IPRO foram cultivadas em vasos em casa de vegetação na Fazenda Capim Branco da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Quando as plantas estavam no estágio R3, todas as folhas de cada uma delas foram retiradas e seus folíolos foram destacados. No Laboratório de Mecanização Agrícola da UFU, eles foram processados pelo aparelho LI-COR. Posteriormente, no Laboratório de Irrigação da UFU, os folíolos foram digitalizados por um *scanner* comum, processados pelo software QUANT e, com o auxílio de um paquímetro, o maior comprimento e largura de cada um deles foram mensurados e corrigidos para o formato da folha. De cada uma destas três etapas, valores de área foliar por planta foram encontrados e neles foram aplicados testes de t e análises de regressão linear para computo do coeficiente de determinação (R^2). Não houve diferença estatística significativa entre as áreas foliares estimadas pelos métodos DFc e imagens digitais processadas pelo software QUANT e computada pelo método padrão, independente da cultivar; porém, o ajuste (R^2) foi maior para as estimativas do cultivar UFUS-6901. Assim, conclui-se que os métodos DFc e QUANT podem ser utilizados para estimar a área foliar da soja, com a mesma acurácia obtida pelo método padrão; porém, para a cultura da soja, o método imagens digitais processadas pelo software QUANT pode ser utilizado como referência para novas equações de DFc e, este método, na ausência dos equipamentos necessários, se faz mais útil por não demandar investimento financeiro e não exigir mão de obra qualificada.

Palavras-chave: *Glycine max*; estimativa de área foliar; IAF; equações empíricas; QUANT.

¹ Orientador: Prof. Dr. Cláudio Ricardo da Silva (UFU).

ABSTRACT

CURTT, Fabiana Franchini. **Leaf area estimation in soybean using leaf size and digital image methods.** 2019. 32p. Monography (Undergraduate in Agronomy) – Federal University of Uberlândia.²

Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] is the main crop in Brazil. Its expected production in the 2018/2019 harvest is 115 million tons, referring to 36 million hectares of agricultural land. To follow the growth of the plants in the field and to estimate the production or losses resulting from the stimuli or stresses affected by the crop, it is necessary to use parameters such as the leaf area index (LAI), given by the quotient between the leaf area (LA) and the soil area occupied by it. The LAI is directly related to productivity and its depends on the accuracy of the computation/estimation of the LA. The methods for computing/estimating LA can be divided into destructive and non-destructive; for the soybean crop, numerous studies were developed using these two types of methods. The methods digital integration (LI-COR) and the foliar size, for example, are the most used. The LI-COR method is used as a standard because of its high accuracy. However, QUANT software, which estimates leaf area from scanned images, may be a viable option in replacing LI-COR, at its lower cost. Therefore, the objective of this study was to compare the accuracy of the corrected leaf size (DFc) and images scanned and processed by the QUANT software with the LI-COR method (standard). For this, soybean plants of cultivars UFUS-6901 and BRASMÁX Flecha IPRO were cultivated in pots under greenhouse conditions at Fazenda Capim Branco, Federal University of Uberlândia (UFU). When the plants were in the R3 stage, all the leaves of each of them were removed and their leaflets were detached. At the Agricultural Mechanization Laboratory of UFU, they were processed by the LI-COR device. Later, at the UFU Irrigation Laboratory, the leaflets were digitized by a common scanner, processed by the QUANT software and, with the aid of a caliper, the largest length and width of each were measured and corrected for the leaf format. From each of these three steps, leaf area values per plant were found and t-tests and linear regression analysis were applied to the coefficient of determination (R^2). There was no statistically significant difference between the leaf areas estimated by the DFc and QUANT methods and computed by the standard method, independent of the cultivar; however, the adjustment (R^2) was higher for the estimates of the cultivar UFUS-6901. Thus, it is concluded that the DFc and QUANT methods can be used to estimate the leaf area of the soybean, with the same accuracy as the standard method; however, for the soybean, the QUANT method can be used as a reference for new DFc equations, and this method, in the absence of the necessary equipment, is more useful because it does not require financial investment and does not require skilled labor.

Keywords: *Glycine max*; leaf area estimation; LAI; empirical equations; QUANT.

² Advisor: Professor Cláudio Ricardo da Silva, PhD (UFU).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1 Importância da cultura da soja no Brasil e em Minas Gerais	8
2.2 Aspectos botânicos e culturais da soja	9
2.3 Avaliação do crescimento de plantas de soja	11
2.4 Métodos de obtenção de área foliar.....	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 Localização e condução do experimento	16
3.2 Obtenção da área foliar total por planta	17
3.2.1 Usando o integralizador de área foliar.....	18
3.2.2 Usando o programa computacional QUANT.....	18
3.2.3 Usando a equação proposta por ADAMI et al. (2008)	18
3.3 Análise estatística.....	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
6 CONCLUSÃO	26
REFERÊNCIAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

As folhas são os órgãos interceptadores da radiação solar que, mediada pelos pigmentos de clorofila, abundantes nelas, será convertida em energia, ou seja, são responsáveis pela maior porcentagem de fotossíntese realizada pela planta e, portanto, o crescimento foliar está diretamente relacionado ao acúmulo de massa e, conseqüentemente, à produtividade (SETIYONO et al., 2008). Desta forma, a área foliar de uma planta cultivada é uma variável importante para estudos ecofisiológicos, principalmente aos relacionados as taxas de fotossíntese e de respiração celular, pois envolvem a produção vegetal e ela está relacionada diretamente ao crescimento das plantas (BLANCO; FOLEGATTI, 2005; KUMAR, 2009).

A determinação da área foliar é muito utilizada, agronomicamente, para calcular o índice de área foliar (IAF), que expressa o quociente entre a área foliar (AF) e a área de solo por ela ocupada e varia conforme o número de folhas por planta e o número de plantas na área (HEIFFIG et al., 2006). Para a soja, o IAF até o período de enchimento de grãos está diretamente relacionado a produtividade (ISODA et al., 2010; LIU et al., 2005). Assim, o IAF, se corretamente estimado, pode ser utilizado para o acompanhamento fisiológico da cultura. Dessa forma, considerando que entre as duas variáveis desse índice, a área de solo é uma variável fixada, a acurácia do IAF depende exclusivamente da acurácia da estimativa de AF.

Os métodos de estimativa de área foliar podem ser classificados em não-destrutivos ou destrutivos (MARSHALL, 1968) e diretos ou indiretos (JONCKHEERE et al., 2004; WEISS et al., 2004). Os métodos não-destrutivos consistem na medida da área foliar diretamente na planta, sem a necessidade de coleta de folhas; por isso, eles são úteis, principalmente quando se tem pouco material (poucas plantas e/ou plantas com poucas folhas disponíveis); quando há o interesse em acompanhar uma mesma planta ao longo do tempo (a remoção de folhas impacta no desenvolvimento da planta) e quando se espera o resultado *in situ* (mensuração e estimativas podem ser feitas no campo) (BLANCO; FOLEGATTI, 2005). Os métodos destrutivos, por sua vez, exigem a remoção de folhas, demandando maiores áreas de parcelas experimentais para computar a área foliar durante o ciclo de cultivo (LIMA et al., 2008; AQUINO et al., 2011). Porém, são mais simples e mais precisos do que os métodos não-destrutivos (SOOMER; LANG, 1994; TAVARES-JUNIOR, 2002). No computo direto, às medidas são feitas diretamente na folha, sendo mais precisos quando bem aplicados, mas

também demandam mais tempo, mão-de-obra qualificada e aparelhos específicos, resultando em maiores custos operacionais. As estimativas indiretas, por sua vez, são tomadas com base em correlações entre a(s) variável(eis) facilmente medidas e a área foliar (JONCKHEERE et al., 2004; WEISS et al., 2004).

No método destrutivo, utiliza-se um integralizador digital (*scanner*), no qual as folhas são digitalizadas e a área foliar é determinada pelo equipamento. No mercado, existem diferentes modelos e fabricantes como o LI-3100C da LI-COR e o CI-202 da CID Bio-Science, embora no Brasil, o primeiro seja o mais utilizado. Devido a sua acurácia, este modelo tem sido considerado como padrão para determinação da área foliar de diversas plantas (DALMAGO et al., 2017; SILVA et al., 2015; SOUSA et al., 2015; ZEIST et al., 2014). Recentemente, novos métodos destrutivos indiretos têm sido propostos. Nesses métodos, faz-se a digitalização das folhas, como por exemplo, por uma câmera digital e o processamento e integralização da área foliar por programas computacionais, como o QUANT (LIBERATO, 2003), o SIARC 3.0 (JORGE, 1996), o ImageJ (<https://imagej.nih.gov/ij/>) (ABRÀMOFF; MAGALHÃES; RAM, 2004) e o SigmaScan Pro (<https://systatsoftware.com/products/sigmascan/>) (SPSS, 1998), que possuem funções próprias, no caso do primeiro, ou adaptadas, no caso dos demais, para estimar a área foliar. Destes, o QUANT é o único que foi desenvolvido especificamente para estimar a área foliar (incluindo a área foliar lesionada, importante para estudos de quantificação de doenças) e apresenta acurácia comprovadamente equivalente à do aparelho LI-COR (LIBERATO, 2003).

Embora os métodos destrutivos apresentem, na sua maioria um custo menor em relação ao modelo padrão, ainda exigem um conhecimento prévio do programa computacional. Desta forma, os métodos não-destrutivos, que se baseiam na medição do comprimento e da largura das folhas e equações empíricas que estimam a área foliar (BAKHSHANDEH; KAMKAR; TSIALTAS, 2011; RICHTER et al., 2014; ZANON et al., 2015) são ainda muito utilizados devido a sua praticidade. Porém, os resultados de acurácia ainda são inferiores aos métodos destrutivos.

Considerando os arrazoados acima, este trabalho objetivou comparar a estimativa da área foliar de duas cultivares de soja feita por um método destrutivo indireto (imagens digitalizadas processadas pelo programa QUANT) e um método não-destrutivo (correlações entre as dimensões foliares) com o método considerado padrão (integralizador de área foliar).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância da cultura da soja no Brasil e em Minas Gerais

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é a principal espécie agrícola de vários países, sendo cultivada em larga escala (HYMOWITZ; NEWELL, 1981; CHUNG; SINGH, 2008) e, assim, favorecendo os interesses dos mercados internos e, principalmente, externos (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015), devido a multiplicidade de usos do seu produto final: os grãos. Eles possuem teores médios de 40% de proteínas, 25% de lipídeos e 17% de carboidratos (SILVA et al., 2006). Quando processados em farinha e óleo, principalmente, os grãos são fontes cruciais de proteína e óleo para a alimentação humana e animal. Por exemplo, o óleo de soja é o mais consumido no mundo, apesar de não ser a oleaginosa de maior concentração de lipídeos. Isto se deve ao baixo custo de produção da cultura (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015). Ademais, a soja apresenta relações com a saúde humana, por sua qualidade nutricional e conteúdo de minerais e fibras (MORAIS; SILVA, 2000; YOUNG, 1991) e além do uso na indústria alimentícia, a soja também é utilizada para a produção de biocombustíveis e nas indústrias farmacêutica e cosmética (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015).

No Brasil, a soja foi introduzida em 1882 (BONATO; BONATO, 1987; SEDIYAMA, 2016) e, a partir da década de 1970, com esforços em diversas áreas do conhecimento, a produção da cultura no país foi aumentando até ocupar a segunda posição no ranking dos maiores produtores mundiais (CONAB, 2019; USDA, 2019). Na safra 2018/2019, 60% das áreas agricultáveis foram ocupadas com a soja, totalizando cerca de 36 milhões de hectares, com produção esperada de 115 milhões de toneladas (CONAB, 2019). A região Centro-Sul abriga seis dos estados com maiores áreas cultivadas com a cultura e produção total (em ordem decrescente, Mato Grosso, Rio Grande de Sul, Paraná, Goiás, Mato Grosso Sul e Minas Gerais), representando 85% da produção nacional; porém, destes, a maior produtividade é encontrada em Minas Gerais (3.326 kg ha⁻¹) (CONAB, 2019).

A mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba é a de maior importância para o estado de Minas Gerais, por ser responsável por mais da metade da área cultivada e da produção estadual da cultura da soja (IBGE, 2017). Dos grãos produzidos nesta região, soja e milho, alternados na safra e na entressafra, representam 88% da produção total (MINAS GERAIS, 2017). Não obstante, é no Triângulo Mineiro que estão os principais municípios produtores destes grãos, de todo o estado, sendo assim, a região de maior impacto neste

segmento do agronegócio (IBGE, 2017); por conseguinte, aliado ao maior valor de mercado (CONAB, 2019), a cultura de soja é a de maior importância econômica para o Triângulo Mineiro. Assim, apesar do aumento de 4,3 vezes na produção estadual da cultura nos últimos 20 anos, é crucial a realização de trabalhos de pesquisa e inovação que objetivem o aumento da produtividade da soja, como o desenvolvimento de cultivares geneticamente superiores e o aumento da eficiência das práticas de manejo visando aumentar a produção e, conseqüentemente, o retorno financeiro, sem implicar no aumento das áreas cultivadas (MINAS GERAIS, 2017).

2.2 Aspectos botânicos e culturais da soja

A soja é uma planta dicotiledônea da família Fabaceae, componente da tribo Phaseoleae, que também inclui os gêneros *Phaseolus* e *Vigna* (CHASE et al., 2016). Seu ciclo é anual, variando de 70 a 200 dias para cultivares precoces e tardios, respectivamente (SEDIYAMA, 2016). O ciclo é denominado precoce quando é completado em até 100 dias, semiprecoce entre 101 e 110 dias, médio de 111 a 125 dias, semitardio entre 125 e 145 dias e tardio quando superior a 145 dias. Dentro do ciclo, os estádios de desenvolvimentos são divididos em dois grandes grupos: vegetativos (*juvenis*) e reprodutivos. Os estádios vegetativos englobam o período entre a emergência das plântulas à abertura dos primeiros botões florais, enquanto os estádios reprodutivos, englobam o período entre o início da floração até a maturação. A mudança entre os dois grandes grupos de estádios é condicionada pela sensibilidade dos cultivares ao fotoperíodo (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015). Portanto, os cultivares são classificados em grupos de maturação (GM), variando de 0 a 10, de acordo com a latitude. Quanto menor a latitude, maior o GM e quanto menor o GM, mais precoce é o cultivar. Esta classificação é de fundamental importância para recomendação de cultivares entre diferentes regiões, no Brasil, por exemplo, cultivares com GM próximo de 10 são recomendados para o extremo Norte do país, enquanto cultivar com GM próximo de 5 são recomendados para a região Sul (ALLIPRANDINI et al., 2009).

Independentemente do ciclo, o caule da soja é do tipo haste, herbáceo, ereto e pubescente. A sua altura em cultivares comerciais varia em função do local e época de cultivo, variando de 0,69 a 1,53 m (REZENDE; ARRUDA-CARVALHO, 2007), que podem ser classificados, de acordo com seu hábito de crescimento, em determinados e indeterminados. No primeiro caso, o crescimento vegetativo é interrompido por ocasião do florescimento, e no segundo, o florescimento não interrompe o crescimento vegetativo, podendo dobrar sua altura após o início da floração. Porém, no primeiro caso, as plantas

possuem menor altura, menor número de nós, mas maior ramificação. Entre estas duas classificações, o crescimento semideterminado engloba cultivares que crescem após o florescimento, mas que já completaram 70% do seu desenvolvimento vegetativo anteriormente (NOGUEIRA et al., 2009).

O colo da planta divide em parte subterrânea e parte aérea. Na parte subterrânea, desenvolve-se um sistema radicular, semelhantemente ao de outras plantas da família Fabaceae, composto por uma raiz principal pivotante, ramificada em raízes secundárias com abundância de nódulos de fixação biológica do nitrogênio atmosférico, proveniente da associação simbiótica entre a planta e bactérias diazotróficas do gênero *Bradyrhizobium*, neste caso (REIS et al., 2006; SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015). Por isso, quando o processo inoculação via semente é bem feito, ele pode fornecer todo o nitrogênio necessário para o ciclo completo da cultura, economizando com adubações nitrogenadas e promovendo restos culturais ricos deste nutriente, que podem ser utilizados para enriquecer o solo (PADOVAN et al., 2002; REIS et al., 2006).

Na parte área, insere-se três tipos de folhas na haste, em ordem crescente: um par de folhas cotiledonares, um par de folhas unifoliadas e vários pares de trifólios. Nos dois primeiros, a filotaxia é oposta e, no terceiro, é alternada. Os trifólios, no início de seu desenvolvimento, possuem folíolos pequenos e cilíndricos, que se desenrolam e vão crescendo até sua abertura completa, formando folíolos grandes e de formato variando entre lanceolados estreito ou triangular e oval pontiagudo ou arredondado (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015). Uma folha é considerada completamente desenvolvida quando os bordos de seus folíolos não mais se tocam, ou seja, estão completamente abertos (FEHR; CAVINESS, 1977). Nos cultivares de crescimento indeterminado, as folhas e os pecíolos são maiores na região central da haste, enquanto nos cultivares de crescimento determinado, estas dimensões são mais uniformes (NOGUEIRA et al., 2009). De qualquer forma, os trifólios são os maiores responsáveis pela interceptação da radiação solar e, conseqüentemente, pela maior taxa líquida de fotossíntese, devido ao seu maior número e tamanho em comparação com os outros tipos de folhas presentes na soja.

As flores são folhas modificadas, que na soja, além da corola nas cores brancas ou roxas, a depender do cultivar, também possuem cálice, gineceu e androceu, por isso são denominadas completas, e estão organizadas em inflorescências racemosas. As inflorescências são produzidas nos ramos terminais ou axilares. Cultivares de crescimento determinado e semideterminado possuem ambos os tipos e cultivares de crescimento

indeterminado não possuem inflorescência terminal (NOGUEIRA et al., 2009). As flores individuais são cleistogâmicas, onde a fecundação ocorre antes da abertura do botão floral; decorrente disto, a soja é considerada uma planta autógama, sendo a taxa de fecundação igual ou superior a 95% (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015). Porém, independente do processo de cruzamento, após a fecundação são produzidos frutos do tipo vagem, achatados, curtos, comumente de cor verde, quando imaturos e amarelo-palha, quando maduros, e que concentram de duas a cinco sementes. As sementes são elípticas e achatadas, de tons amarelados, verde ou preto (NOGUEIRA et al., 2009; SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015) e possuem a constituição genética de uma planta: quatro pares de 10 cromossomos que segregam em dois pares ($2n = 4x = 40$), portanto, são tetraploides que se comportam citogeneticamente como diploides (SHOEMAKER; SCHLUETER; DOYLE, 2006).

Após a frutificação, o enchimento dos grãos se dá pela translocação de recursos adquiridos da planta para eles. Posteriormente á esta fase, ocorre a maturação fisiológica das sementes, quando o acúmulo de translocados é interrompido e os frutos perdem sua coloração verde, dando lugar a frutos de aspecto dourados. Os grãos, com cerca de 60% de umidade nesta fase, já possuem função de semente, podendo originar plantas filhas sob condições adequadas a germinação; porém, é necessário que a maturação continue para reduzir a umidade ao limite crítico (15% ou inferior) para a colheita e armazenamento (maturação plena). As denominações grão e semente são referentes ao uso, considera-se semente quando este propágulo for usado para construção de uma nova planta (FEHR; CAVINESS, 1977; SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015).

2.3 Avaliação do crescimento de plantas de soja

O crescimento de uma planta durante seu ciclo de cultivo está relacionado a sua dinâmica com o ambiente, respondendo diretamente a estímulos ou estresses. Inoculação de sementes com bactérias diazotróficas, adubação equilibrada, irrigação eficiente, entre outros, colaboram para que o potencial produtivo máximo de uma planta seja atingido, ao passo que a herbivorias, patologias e competições com plantas infestantes colaboram para o contrário (TAIZ; ZEIGER, 2009). Faz-se necessário a avaliação do crescimento vegetal, para verificar as respostas da planta a estes fatores.

Vários parâmetros podem ser relacionados ao rendimento máximo da cultura da soja, mas os principais e mais práticos são o computo da matéria seca (fitomassa) e a estimativa da dimensão do aparelho fotossintetizante (área foliar). Ambos estão relacionados

à taxa fotossintética (WELLS, 1991; WELLS, 1993). A fitomassa é obtido através do arranquio, secagem e aferição da massa, de quaisquer plantas ou órgão vegetais. Por necessitar o arranquio de plantas, este parâmetro torna-se um inconveniente por reduzir a população da cultura no campo. Por outro lado, a área foliar não exige a remoção de plantas, em alguns casos, exige a remoção de algumas folhas, causando impactos menores do que a remoção de plantas inteiras; mas, como para a cultura da soja há uma correlação positiva significativa entre a área foliar e a fitomassa, o compute do primeiro parâmetro pode substituir o compute do segundo (FIALLOS; FORCELINI, 2011).

De toda a planta, as folhas são órgãos que contêm as maiores quantidades de clorofila e apresentam-se espacialmente dispostas à interceptação da radiação solar incidente. Após a interceptação, a radiação solar será convertida em energia e os fotoassimilados serão translocados para os demais órgãos. Portanto, a dimensão da superfície foliar tem correlação positiva com a interceptação da radiação solar e está diretamente relacionada ao acúmulo de fitomassa e, conseqüentemente, à produção (FIALLOS; FORCELINI, 2011; ISODA et al., 2010; LIU et al., 2005).

O principal parâmetro que utiliza a área foliar é o índice de área foliar (IAF), obtido pelo quociente entre área foliar (AF) e a área de solo por ela ocupada, é adimensional e dependente do número de folhas por plantas e do número de plantas na área (HEIFFIG et al., 2006). À medida que a área foliar isolada corresponde a produção individual de uma planta, o IAF corresponde a produção por área (produtividade). Na cultura da soja, o IAF entre as fases de emergência das plântulas e o florescimento pleno aumenta linearmente, variando de 5 a 8 (CÂMARA; HEIFFIG, 2000) em função do crescimento e emergência de novas folhas. Já nas fases de frutificação e maturação, o IAF é decrescente, decorrente da senescência e queda de folhas (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015).

O IAF crítico representa a quantidade de folhas requeridas para interceptação de 95% da radiação solar ao meio dia (HEIFFIG et al., 2006). Ele é atingido nos primeiros estádios da fase reprodutiva, quando as plantas possuem o maior número de folhas. No estádio R1 (início do florescimento – uma flor aberta em qualquer nó da haste principal; FEHR; CAVINESS, 1977), o IAF crítico é de 3,5 a 5,0 (BOARD; HARVILLE, 1992; DALLAGNOL; SUZANA, 2016). Porém, na fase decrescente de IAF o crescimento é constante e a taxa de interceptação da radiação solar é estabilizada; não havendo mais contribuição líquida ao acúmulo de fotoassimilados, o IAF neste caso é denominado “ótimo” (CASAROLI, 2007; DALLAGNOL; SUZANA, 2016).

Além de estimar a produtividade, o IAF permite estimar perdas. Em situações de desfolha, a taxa de fotossíntese diminui, afetando o rendimento da planta (OWEN et al., 2013). Assim, se o IAF em um campo de cultivo for inferior ao IAF esperado, é possível quantificar as perdas decorrentes da desfolha. Então, conhecendo-se a causa da desfolha, pode-se tentar evitá-la aplicando produtos para o controle de pragas, doenças ou plantas infestantes e/ou produtos para adubação ou regulação de crescimento (NARDINO et al., 2015; TORMEN et al., 2012). Entretanto, se a desfolha for amena, a soja ainda é capaz de produzir a quantidade necessária de fotoassimilados para garantir sua produção máxima, compensando os pequenos desfalques (BUENO, et al., 2010; PEIXOTO et al., 2000). Portanto, para cultivares em que o nível de desfolha é conhecido, o IAF pode ser usado como parâmetro base para decisão do uso de medidas de controle ou outras medidas culturais necessárias para tentar impedir que a desfolha abaixe o IAF para níveis onde não há mais compensação.

2.4 Métodos de obtenção de área foliar

Em vista dos múltiplos usos do IAF, é importante ressaltar que a qualidade de sua estimativa é dependente da estimativa de suas variáveis: a área foliar (AF) e a área de solo por ela ocupada. Sendo a área do solo uma variável fixada, a estimativa de AF é o ponto-chave para inferências com o IAF. Quanto maior a qualidade da primeira, melhor a qualidade do segundo.

Os métodos de estimativa de área foliar mais utilizados são o método das dimensões foliares e o método do aparelho LI-COR. O primeiro é não-destrutivo indireto, enquanto o segundo é destrutivo direto. No método das dimensões foliares, a área foliar é estimada por meio do produto entre o maior comprimento e a maior largura da folha, corrigido por um fator de correção que considera o formato dela. O método do aparelho LI-COR calcula a área foliar pelo princípio de células de grade de área conhecida, sendo de acurácia superior aos demais métodos conhecidos, por isso, é usado como referência. Sua principal desvantagem é o elevado custo e, por ser um método destrutivo, a necessidade de remoção das folhas. Então, muitos trabalhos foram realizados objetivando ajustar o fator de correção do método das dimensões foliares com base na área foliar computada pelo aparelho LI-COR.

ADAMI et al. (2008), utilizando uma equação empírica com o fator de correção 0,7104 para corrigir o produto entre o comprimento e a largura de folhas de soja, obtiveram

ajustes superiores a 98% entre o método de dimensões foliares e o LI-COR, porém, houve superestimativa. Também utilizando o aparelho LI-COR como referencial de área foliar, FLUMIGNAN, ADAMI e FARIA (2008), para *Coffea arabica*, obtiveram ajuste e acurácia superiores a 99%, resultados atestados por MISGANA, DABA e DEBELA (2018). Para *Coffea canephora*, BRINATE et al. (2015) e SCHMILDT et al. (2015), usando equações lineares, quadráticas e exponenciais, apresentaram ajustes superiores a 92% e 97%, respectivamente. Usando estes três tipos de equações, CARGNELUTTI-FILHO et al. (2012; 2015) para nabo forrageiro e feijão-guandu e TARTAGLIA et al. (2016) para canola, obtiveram ajustes superiores a 90%. Nos dois primeiros, os ajustes para equações exponenciais foram superiores a 98% e 97%, respectivamente. LUCENA et al. (2018), para *Urochloa mosambicensis*, não encontraram diferenças entre equações lineares e exponenciais. Ambas apresentam ajustes e acurácia superiores à 99%.

Outro método de referência utilizado é a digitalização de folhas seguido por processamento digital das imagens. Os programas computacionais (*softwares*) SIARC 3.0 (JORGE, 1996), ImageJ (ABRÀMOFF; MAGALHÃES; RAM, 2004) e SigmaScan Pro (SPSS, 1998) servem a este propósito. Os três softwares apresentam processamento que utiliza uma medida relativa a um padrão de referência. Porém, os dois primeiros são de código livre, enquanto o terceiro é privado. O SIARC 3.0, desenvolvido pela Embrapa para uso em Ciência do Solo (JORGE, 1996), foi adaptado para a estimar a área foliar e, utilizando-o como referência, o método das dimensões foliares para a cultura do algodoeiro obteve ajustes de 71 a 98% (MONTEIRO et al., 2005).

O ImageJ vem sendo utilizado para estimativa de área foliar. Considerando o LI-COR como referência, seu ajuste é superior a 93% e, o método das dimensões lineares por ele corrigido tem ajuste superior a 90% (HELDWEIN et al., 2018). SACHET et al. (2015), com folhas de pessegueiro, obteve ajuste de 96% entre o método das dimensões foliares e o ImageJ. O SigmaScan Pro, quando utilizado com referência, apresentou ajustes superiores a 90% para o método das dimensões para a área foliar da aceroleira (LUCENA et al., 2011), canola (CARGNELUTTI-FILHO et al., 2015) e *Crotalaria juncea* (CARVALHO et al., 2017).

O software QUANT é gratuito e foi desenvolvido para estudos de fitopatometria, ele mensura a área foliar total e a área foliar lesionada a partir de imagens digitais. Então, apesar de seguir os mesmos princípios dos outros três softwares, ele foi desenvolvido especificamente para estimativas de área foliar (LIBERATO, 2003). O QUANT apresenta

acurácia superior a 98%, precisão de 99,99% e ajuste de 97% ao LI-COR, na estimativa da área foliar de pimentão (LIBERATO, 2003), portanto, pode ser levado em conta como referencial na estimativa de área foliar quando não se tem o aparelho LI-COR. O material necessário para seu uso é um integralizador digital (*scanner*) e um computador doméstico (LIBERATO, 2003). RICHTER et al. (2014), usando a estimativa de área foliar do software QUANT como referência, ajustou o método das dimensões foliares para cultivares de soja de crescimento determinado e indeterminado, obtendo um fator de correção de 2,0185 para o produto entre o comprimento e a largura do folíolo central. O método de dimensões foliares comparado com as estimativas deste software para a área foliar de limoeiro-cravo, apresentou ajuste superior a 98% e acurácia de 95% (SILVA-AFONSO et al., 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e condução do experimento

O experimento foi realizado, sob condições de casa de vegetação, na fazenda Capim Branco da Universidade Federal de Uberlândia – UFU, que é situada nas coordenadas geográficas 18,88° latitude sul (S) e 48,34° longitude oeste (O), com altitude de 900 metros (m). O ensaio foi conduzido durante os meses de março a maio de 2016. A casa de vegetação possui, em seu interior, cinco bancadas suspensas a 1,0 m do solo com dimensões de 18 x 0,8 m. As laterais apresentam telas de sombreamento pretas cobertas por filme de polietileno transparente (Figura 1).

No monitoramento das condições meteorológicas no interior da casa de vegetação foi utilizado uma estação automática (modelo Vantage Pro2, Davis, EUA) que compilava os dados e exibia os resultados de 10 em 10 minutos. Os sensores da estação foram programados para medir a temperatura (°C) e umidade relativa do ar (%). As médias encontradas durante o experimento foram de 25,6°C, 24,7°C e 25,53°C para as temperaturas médias, mínimas e máximas, respectivamente e, 66,26 % de umidade.

Foram utilizados duas cultivares de soja, um de crescimento determinado (UFUS 6901) e um de crescimento indeterminado (BRASMÁX Flecha IPRO), que foram semeados a uma profundidade de 3 a 5 cm em vasos. Em cada vaso foram depositadas seis sementes e, após uma semana da semeadura foi feito o desbaste, deixando duas plantas em cada um. Desta forma, foram formadas 20 parcelas experimentais e cada uma delas consistiu de um vaso com duas plantas (Figura 1).

Os vasos possuíam capacidade para 8,14 dm³ e foram preenchidos com Latossolo Vermelho Escuro Distrófico com textura argilosa, proveniente da área experimental próxima a casa de vegetação, coletado a 20 cm de profundidade. Amostras deste solo foram submetidas a análise química, no Laboratório de Análises de Solo (LABAS) da UFU, que constatou os seguintes resultados: pH 6,1; teores de 1,3; 103 e 4 de P, K e S (mg dm⁻³); teores de 2,0; 0,9; 0,0 e 2,6 de Ca⁺², Mg⁺², Al⁺³ e H+Al (cmol dm⁻³); soma de bases (SB) de 3,16 cmol dm⁻³; quantidade de matéria orgânica de 2,8 dag kg⁻¹ e saturação por bases (VB) de 61%. Com base nestes resultados, no momento da semeadura foi realizada a adubação de base, a uma profundidade de 7 a 10 cm, com 3 g do formulado 4-14-08 (N-P-K), além da inoculação das sementes com 7,0 x 10⁸ células mL⁻¹ de *Bradyrhizobium* spp., visando o

estabelecimento das relações simbióticas bactéria-planta e, conseqüentemente, o suprimento do nitrogênio necessário para a planta. Ao longo do ciclo, ainda foram realizadas adubações de cobertura conforme as recomendações da Embrapa Soja (2011) para a cultura no estado de Minas Gerais.

Os vasos foram irrigados com o objetivo de manter a umidade do solo na capacidade de campo. Para a determinação da umidade na capacidade de campo foram utilizados 18 vasos semelhantes aos utilizados neste experimento que foram preenchidos com solo e saturados. A massa destes vasos foi aferida. Na seqüência, estes vasos foram drenados naturalmente (2 dias), e sua massa foi aferida novamente. Assim, sabendo-se a pesagem na capacidade de campo ($9,0 \pm 0,4$ kg), buscou-se mantê-la utilizando gotejadores autocompensantes (Pc Emmiter 2 GHP, Rain Bird, EUA), de vazão nominal de $7,2 \text{ L h}^{-1}$, instalados em cada um dos vasos. O acionamento do sistema de irrigação foi iniciado no décimo quinto dia após a emergência das plantas, em intervalos iniciais de dois dias, progredindo para um intervalo diário.



Figura 1. Disposição experimental dos vasos, na casa de vegetação localizada na Fazenda Capim Branco da Universidade Federal de Uberlândia.

3.2 Obtenção da área foliar total por planta

Após 58 dias da sementeira, quando as plantas estavam no estágio R3 (início da formação das vagens) (FEHR; CAVINESS; 1977), todas as folhas de cada planta foram

destacadas da haste, armazenadas em saco de papel e encaminhadas para os Laboratórios de Mecanização e Irrigação da UFU, no campus Umuarama.

3.2.1 Usando o integralizador de área foliar

No laboratório de Mecanização, as folhas foram inseridas no aparelho LI-COR 3100C (Figura 2) e a área foliar (cm^2) de cada planta foi determinada na resolução de 1 mm^2 (25 dpi). Este aparelho é um sistema contínuo acionado por correias transportadoras de vinil transparente, que mede a área acumulada em função da intensidade da luz; as folhas são inseridas em uma esteira de correias transportadoras (vinil, transparente), que carregam as folhas até o scanner. A esteira é maleável e permite que a área foliar seja mensurada com alta acurácia mesmo quando há rugosidades na folha (KERSHAW; LARSEN, 1992).

3.2.2 Usando o programa computacional QUANT

Na sequência, as mesmas folhas foram digitalizadas (Figura 3) por meio de uma impressora laserjet multifuncional da marca HP modelo M 1120 pertencente ao Laboratório de Irrigação. As imagens resultantes foram arquivadas em uma resolução de 300 dpi e posteriormente processadas por meio do QUANT (LIBERATO, 2003). No programa, para cada arquivo de entrada (imagens obtidas pelo *scanner*) (Figura 4a), foram selecionadas as opções de calibração, exclusão de brilho e mediana (Figura 4b); as cores foram selecionadas por amostragem de forma que a imagem de cada folíolo tivesse uma única cor (Figura 4c). Na sequência, foi solicitado o processamento dos resultados e os referentes a área foliar total, expressos em cm^2 , foram anotados.

3.2.3 Usando a equação proposta por ADAMI et al. (2008)

Por fim, para o método das dimensões foliares, o comprimento máximo e a largura máxima de todos os folíolos de cada uma das folhas foram mensurados com um paquímetro comum, obtendo-se resultados em cm. Posteriormente, os dados coletados foram aplicados na equação empírica proposta por ADAMI et al., 2008 (Equação 1). As estimativas da área foliar de cada folha foram somadas, obtendo-se a área foliar por planta em cm^2 (DFc).

$$\text{DFc} = 0,7104 (\text{CxL}) \quad (1)$$

Em que,

C – Comprimento máximo;

L – Largura máxima;

0,7104 – Fator de correção para o formato ovoide das folhas.



Figura 2. Aparado LI-COR 3100, localizado no Laboratório de Mecanização da Universidade Federal de Uberlândia. As amostras são corridas pelo rolo plástico à medida que o aparelho realiza a leitura da área foliar.



Figura 3. Impressora digitalizadora utilizada para a digitalização dos folíolos de soja e imagem obtida. Laboratório de Irrigação, Universidade Federal de Uberlândia.

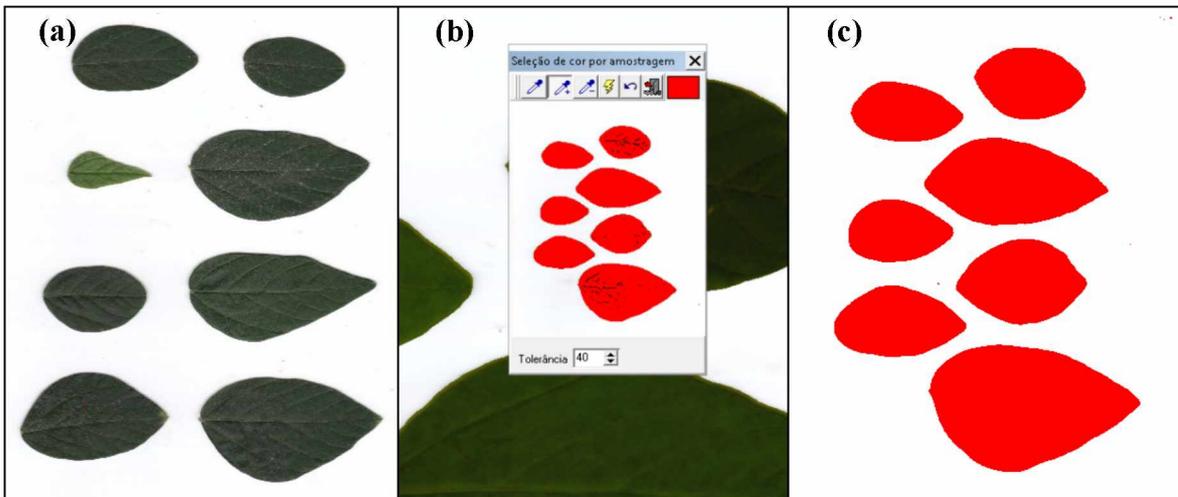


Figura 4. Processamento de imagens pelo software QUANT: (a) arquivo de entrada; (b) primeiro processamento, onde a imagem foi calibrada, teve o brilho excluído e a mediana exposta; e (c) imagem pós-processada, após a uniformização da cor.

3.3 Análise estatística

Para comparar o desempenho dos métodos com o método padrão no computo de área foliar da cultura da soja, foram aplicadas equações de regressão linear simples ($y = ax + b$), para estimar o ajuste dos dados nos modelos (SOUZA et al., 2012). O eixo y representa o método padrão e o eixo x representa os demais métodos (QUANT ou DFC); o coeficiente de determinação (R^2), decorrente desta análise, representa o ajuste dos dados obtidos pelos dois métodos em comparação ao modelo de linearidade. Quanto maior o R^2 , melhor o ajuste.

Na sequência, para uma comparação mais detalhada do desempenho dos métodos, foram utilizados os índices estatísticos: raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) (Equação 2) e do erro médio (EM) (Equação 3), conforme descrito por JACOVIDES E KONTOVIANNIS (1995). RQME representa a magnitude do erro produzido pelo método, variando de zero a infinito, enquanto o EM representa o desvio médio dos valores estimados pelos métodos em comparação em relação aos valores observados no método padrão, valores positivos e negativos quantificam a superestimação e subestimação, respectivamente, do método em questão. De qualquer forma, para ambos os índices, quanto mais próximo de zero forem seus valores, melhor pode ser considerada a estimativa de área foliar (AF).

$$RQME = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (3)$$

Em que,

O_i – valor observado pelo método LI-COR (referencial);

P_i – valor estimado pelos métodos;

n – número de observações.

Por fim, para atestar se os valores de AF computados por cada método diferem significativamente entre si, baseado nos índices RQME e EM foi realizado o teste-t (Equação 4) (JACOVIDES; KONTOYIANNIS, 1995). Assim, como os valores absolutos de seus parâmetros, quanto menor o valor de t , melhor o desempenho do método. Porém, criticamente, se t for menor que o $t_{\text{tab}}(\alpha, \text{gl})$, considera-se que não há diferença entre os dois métodos em comparação (aceita-se a hipótese de nulidade, H_0 : referencial = métodos estimados) (SILVA et al., 2012). Neste trabalho, foi utilizado o nível de significância de 0,05 ($\alpha = 0,05$), com 9 graus de liberdade ($\text{gl} = n - 1$) e $t_{\text{tab}} = 1,833$.

$$t = \left[\frac{(n-1)EM^2}{RQME^2 - EM^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método LI-COR, por sua alta acurácia no computo da área foliar, é considerado como método padrão. Assim, este método, quando comparado aos métodos DFc e QUANT, mostrou que a magnitude do erro (RQME) associado a estimativa da área foliar foi menor para o método DFc, para ambos os cultivares (UFUS-6901 e BRÁSMAX Flecha IPRO) (Tabela 1). O índice EM, indicador de desvios na estimativa, revelou que, para o cultivar UFUS-6901, houve subestimativa de área foliar ($EM < 0$), enquanto para o método QUANT neste cultivar e para ambos os métodos no cultivar BRÁSMAX Flecha IPRO, houve superestimativa ($EM > 0$) (Tabela 1). Porém, quando os métodos foram comparados pelo teste-t, os valores absolutos de t (Tabela 1) menores que o de t_{tab} (1,833, $\alpha = 0,05$) atestam que não há diferença estatística significativa entre os métodos (aceitação da hipótese H_0), para ambos os cultivares. Portanto, apesar das diferenças quanto ao erro associado as estimativas, a acurácia dos métodos DFc e QUANT são equivalentes à acurácia do método padrão.

Os valores menores dos índices RQME e EM para o cultivar UFUS-6901 indicam que os erros associados as estimativas de sua área foliar foram menores, para os métodos DFc e QUANT (Tabela 1). A principal diferença entre os dois cultivares é o hábito de crescimento: determinado para UFUS-6901 e indeterminado para BRÁSMAX Flecha IPRO. Plantas de crescimento indeterminado apresentam maior variação no desenvolvimento foliar do que plantas de crescimento determinado (NOGUEIRA et al., 2009); esta variação pode ser a causa dos índices de erro maiores para o cultivar BRÁSMAX Flecha IPRO.

As análises de regressão linear entre o método LI-COR e os métodos DFc e QUANT (Figuras 5 e 6) devolveram coeficientes de determinação (R^2) superiores à 0.97. Quanto maior os valores de R^2 , melhor são os ajustes das estimativas de área foliar ao método padrão (modelo). Mas, destaca-se que, para ambos os métodos, os ajustes para o cultivar UFUS-6901 foram superiores à 0,99 (Figura 5 a, b).

Tabela 1. Raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME), tendência do erro médio (EM) e valores absolutos de t comparados, para estimativas de área foliar da cultura soja pelos métodos das dimensões foliares (DFc) e pelo processamento digital de imagens (QUANT), tendo como padrão o método LI-COR.

Cultivar	Métodos	RQME (cm ²)	EM (cm ²)	t
UFUS-6901	DFc	9,2354	-0,4353	0,142
	QUANT	10,2670	0,3266	0,0955
BRÁSMAX Flecha IPRO	DFc	27,2227	11,3560	1,377
	QUANT	29,1977	12,6114	1,437

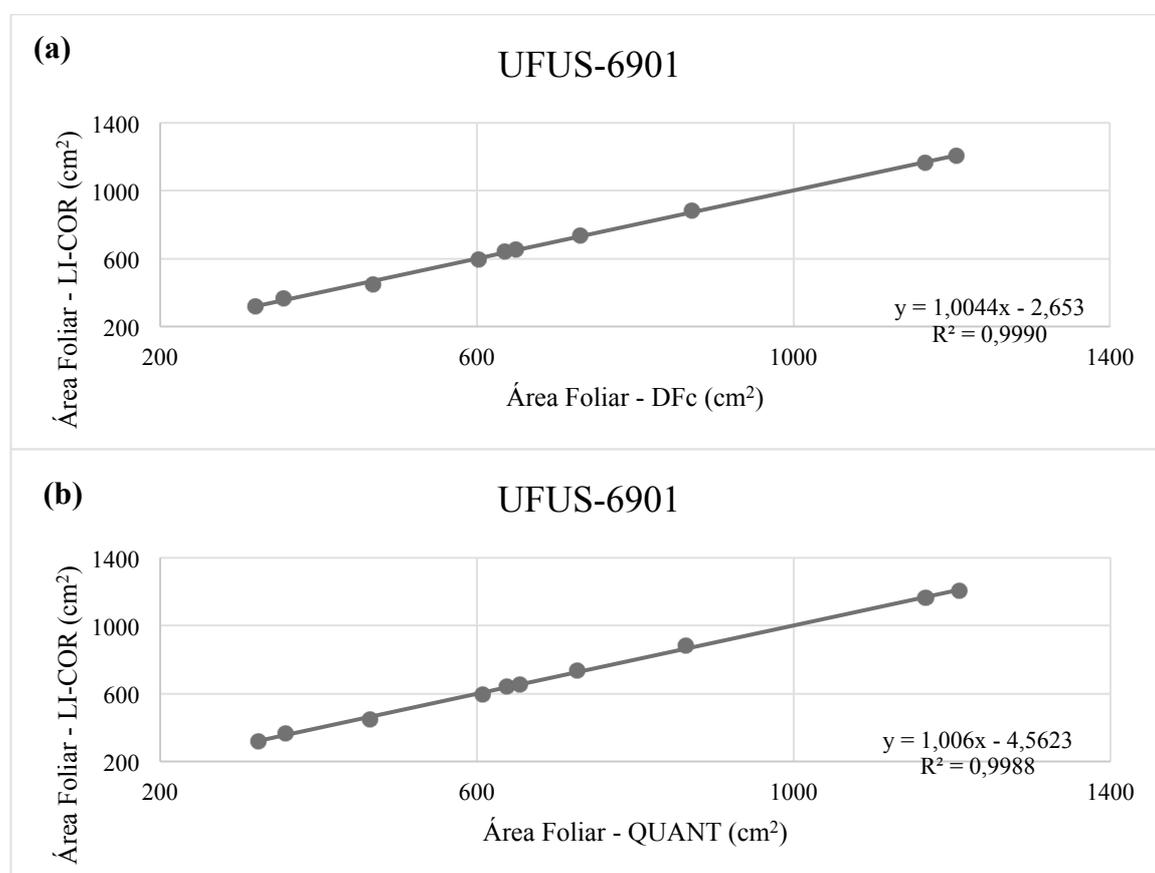


Figura 5. Regressão linear simples e coeficiente de determinação (R^2) entre o método LI-COR (padrão) e os métodos DFc (a) e QUANT (b) para dados de área foliar estimado por cada um deles para o cultivar UFUS-6901. Cada ponto representa a área foliar de uma planta.

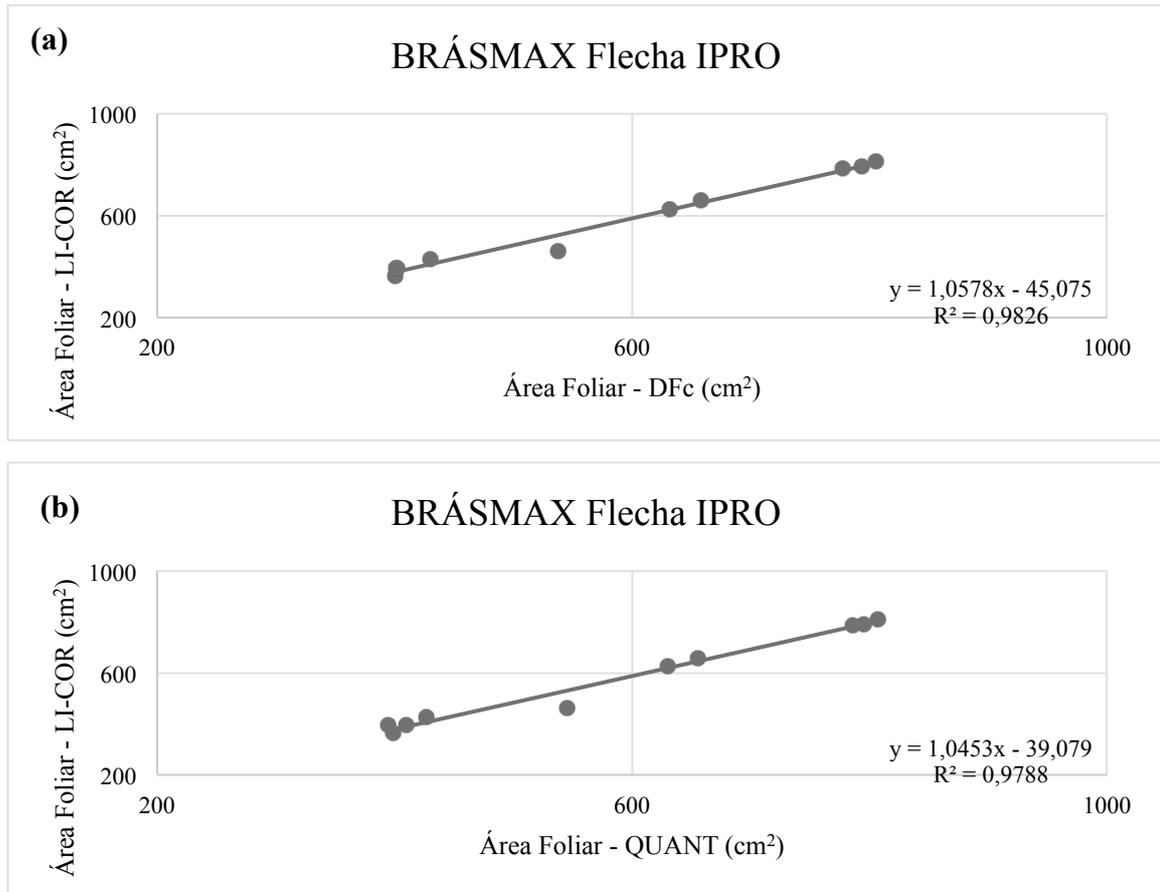


Figura 6. Regressão linear simples e coeficiente de determinação (R^2) entre o método LI-COR (padrão) e os métodos DFC (a) e QUANT (b) para dados de área foliar estimado por cada um deles para o cultivar BRÁSMAX Flecha IPRO. Cada ponto representa a área foliar de uma planta.

Em concordância com os resultados deste trabalho, BAKHSHANDEH, KAMKAR e TSIALTAS (2011) e RICHTER et al. (2014) encontraram ajustes superiores à 0,95 e 0,98, respectivamente, para o método de dimensões foliares corrigidas com base em métodos digitalização. Porém, os valores de RQME, variando de 7,33 a 9,22 para o primeiro e de 6,48 a 16,92 para o segundo, estão de acordo somente com os resultados encontrados para o cultivar UFUS-6901 (Tabela 1). Portanto, para este cultivar, desconsiderando as diferenças entre os métodos de referência, a eficácia da estimativa baseada em correlações entre medidas lineares é semelhante entre os três trabalhos. Quanto ao índice EM, ADAMI et al. (2008), também para a cultura da soja, obtiveram resultados semelhantes quanto a superestimação pelo método das dimensões foliares corrigidas.

ADAMI et al. (2008), utilizando o fator de correção utilizado neste trabalho, obtiveram ajustes superiores a 98% entre o método de dimensões foliares e o método padrão, para estimativas de área foliar da cultura da soja. FLUMIGNAN, ADAMI e FARIA (2008) e MISGANA, DABA e DEBELA (2018), para estimativas de área foliar de *Coffea arabica*, BRINATE et al. (2015) e SCHMILDT et al. (2015), para *Coffea canephora*, CARGNELUTTI-FILHO et al. (2012; 2015) para nabo forrageiro e feijão-guandu, TARTAGLIA et al. (2016) para canola e LUCENA et al. (2018), para *Urochloa mosambicensis*, também encontram ajustes superiores a 90% entre o método das dimensões foliares corrigidas e o mesmo método padrão utilizado neste trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de imagens digitalizadas e processadas pelo software QUANT quando comparado ao método padrão (LI-COR) no que diz respeito ao tempo de execução, é um pouco mais longo e, apesar de não se tratar de um programa complexo, ele necessita de maior disponibilidade por parte do avaliador. Na ocasião em que o custo do equipamento LI-COR seja um complicador limitante, o programa em questão é totalmente recomendável para os mesmos fins.

Ademais, o método de dimensões foliares é significativamente mais trabalhoso e exige um tempo maior do que os outros dois métodos acima. Entretanto, é bastante indicado quando há a necessidade de processos não-destrutivos.

6 CONCLUSÃO

Os métodos de digitalização de imagens e estimativa da área foliar por meio do programa computacional QUANT e de dimensões foliares corrigidas (DFc) podem ser usados para ambos os cultivares UFUS-6901 e BRÁSMAX Flecha IPRO, com a mesma acurácia obtida no aparelho LI-COR. Assim, o método de imagens digitalizadas e processadas pelo software QUANT pode ser utilizado como referência no desenvolvimento de novas equações dentro do método DFc sendo que, este método, na ausência dos equipamentos necessários aos demais, se faz mais útil por não demandar o arranquio e digitalização das folhas, sendo mais fácil, prático e economicamente viável.

REFERÊNCIAS

- ABRÀMOFF, M. D.; MAGALHÃES, P. J.; RAM, S. J. Image processing with ImageJ. **Biophotonics international**, v. 11, n. 7, p. 36-42, 2004.
- 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, n. 4, p. 1053-1058, 2008.
- ALLIPRANDINI, L. F.; ABATTI, C. BERTAGNOLLI, P. F.; CAVASSIM, J. E.; GABE, H. L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M. N.; OLIVEIRA, M. A. R.; PITOL, C.; PRADO, L. C.; STECKLING, C. Understanding Soybean Maturity Groups in Brazil: Environment, Cultivar Classification, and Stability. **Crop Science**, v. 49, n. 3, p.801-809, 2009.
- AQUINO, L. A.; SANTOS-JUNIOR, V. C.; GUERRA, J. V. S.; COSTA, M. M. Estimativa da área foliar do girassol por método não destrutivo. **Bragantia**, v. 70, n. 4, p. 832-836, 2011.
- BAKHSHANDEH, E.; KAMKAR, B.; TSIALTAS, J.T. Application of linear models for estimation of leaf area in soybean [*Glycine max* (L.) Merr]. **Photosynthetica**, v. 49, n. 3, p.405-416, set. 2011. Institute of Experimental Botany.
- BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V. Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p.305-309, jul. 2005.
- BOARD, J. E.; HARVILLE, B. G. Explanations for greater light interception in narrow- vs. wide-row. **Crop Science**, v. 32, n. 1, p. 198-202, 1992.
- BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. A soja no Brasil: história e estatística. **Embrapa Soja-Documentos (INFOTECA-E)**, Londrina, 1987.
- BRINATE, S. V. B.; MARTINS, L. D.; RODRIGUES, W. N.; COLODETTI, T. V.; AMARAL, J. F. T.; TOMAZ, M. A. Accuracy of linear methods to estimate the leaf area of genotypes of conilon coffee. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 30, p. 2955-2960, 2015.
- BUENO, A. F.; BATISTELA, M. J.; MOSCARDI, F.; BUENO, R. C. O. F.; NISHIKAWA, M.; HIDALGO, G.; SILVA, L.; GARCIA, A.; CORBO, E.; SILVA, R. B. Níveis de desfolha tolerados na cultura da soja sem a ocorrência de prejuízos à produtividade. **EMBRAPA, Circular Técnica**, Londrina - PR, 2010.
- CÂMARA, G.M.S.; HEIFFIG, L.S. Fisiologia, ambiente e rendimento da cultura da soja. In: CÂMARA, G.M.S. **Soja: tecnologia da produção**. Piracicaba: ESALQ/LPV. p. 81-120, 2000.
- 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, n. 1, p. 47-51, 2012.

CARGNELUTTI FILHO, A.; TOEBE, M.; ALVES, B. M.; BURIN, C. Estimação da área foliar de feijão guandu por dimensões foliares. **Ciência Rural**, v. 45, n. 1, p. 1-8, 2015.

CARVALHO, J. O.; TOEBE, M.; TARTAGLIA, F. L.; BANDEIRA, C. T.; TAMBARA, A. L. T. Leaf area estimation from linear measurements in different ages of *Crotalaria juncea* plants. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 3, p. 1851-1868, 2017.

CASAROLI, D.; FAGAN, E. B.; SIMON, J.; MEDEIROS, S. P.; MANFRON, P. A.; DOURADO-NETO, D.; LIER, Q. J.; MÜLLER, L.; MARTIN, T. N. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja-uma revisão. **Revista da FZVA**, v. 14, n. 2, 2007.

CHASE, M. W.; CHRISTENHUSZ, M. J. M.; FAY, M. F.; BYNG, J. W.; JUDD, W. S.; SOLTIS, D. E.; MABBERLEY, D. J.; SENNIKOV, A. N.; SOLTIS, P. S.; STEVENS, P. F. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 181, n. 1, p. 1-20, 2016.

CHUNG, G.; SINGH, R. J. Broadening the Genetic Base of Soybean: A Multidisciplinary Approach. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 27, n. 5, p.295-341, 25 set. 2008.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileiro – grãos**: Quinto levantamento, fevereiro 2019 – safra 2018/2019. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/24727_e85b0ce5402219b76fba73d839a62b7>. Acesso em: 23 mar. 2019.

DALLAGNOL, L. C.; SUZANA, C. S. Soybean yield potential estimated in a central region of RS State, Brazil. **Científica**, v. 44, n. 4, p.584-592, 11 nov. 2016.

DALMAGO, G. A.; GOUVÊA, J. A.; CUNHA, G. R.; VICARI, M. B.; KOVALESKI, S. Uso de imagens digitais para estimativa da área foliar da canola. In: **Embrapa Trigo- Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CANOLA, 1., 2017, Passo Fundo. Anais... Brasília, DF: Embrapa, 2017.

EMBRAPA SOJA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de Soja – Região Central do Brasil 2012 e 2013**. Sistemas de Produção. Londrina: Embrapa Soja, Outubro, n. 15, p. 261, 2011.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: State University of Science and Technology, 1977. 11p. (Special report, 80).

FIALLOS, F. R. G.; FORCELINI, C. A. Peso de hojas como herramienta para estimar el área foliar en soya. **Ciencia y Tecnología**, v. 4, n. 1, p. 13-18, 2011.

FLUMIGNAN, D. L.; ADAMI, M.; FARIA, R. T. Área foliar de folhas íntegras e danificadas de caféiro determinada por dimensões foliares e imagem digital. **Coffee Science**, v. 3, n. 1, p. 1-6, 2008.

FONTENELLI, J. L. **Métodos de manutenção de umidade do solo no cultivo do girassol e cártamo em condições controladas**. 2014. 84f. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis-MT, 2014.

HEIFFIG, L. S.; CÂMARA, G. M. S.; MARQUES, L. A.; PEDROSO, D. B.; PIEDADE, S. M. S. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia**, v. 65, n. 2, p. 285-295, 2006.

HYMOWITZ, T.; NEWELL, C. A. Taxonomy of the genus *Glycine*, domestication and uses of soybeans. **Economic Botany**, v. 35, n. 3, p.272-288, jul. 1981.

SILVA, J. R.; HELDWEIN, A. B.; SALVADÉ, D. M.; PUHL, A. J.; AMARANTE, A. A.; BRIXNER, G. F. Estimativa da área foliar da camomila com o uso do ImageJ. **Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa-Congrega Urcamp**, p. 1140-1150, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA – Produção Agrícola Municipal, 2017**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam>>. Acesso em: 01 set. 2019.

ISODA, A.; MAO, H.; LI, Z.; WANG, P. Growth of High-Yielding Soybeans and its Relation to Air Temperature in Xinjiang, China. **Plant Production Science**, v. 13, n. 2, p.209-217, jan. 2010.

JACOVIDES, C. P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. **Agricultural Water Management**, v. 27, n. 3-4, p. 365-371, 1995.

JONCKHEERE, I; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; BARET, F. Review of methods for *in situ* leaf area index determination. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, n. 1-2, p.19-35, 2004.

JORGE, L. A. C. Recomendações práticas para utilização do SIARCS 3.0 nos estudos de raízes, cobertura vegetal, folhas e outras aplicações. **Embrapa Instrumentação-Recomendação Técnica (INFOTECA-E)**, 1996.

KERSHAW, J. A.; LARSEN, D. R. A rapid technique for recording and measuring the leaf area of conifer needle samples. **Tree Physiology**, v. 11, n. 4, p.411-417, 1992.

KUMAR, R. Calibration and validation of regression model for non-destructive leaf area estimation of saffron (*Crocus sativus* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 122, n. 1, p.142-145, set. 2009.

LIBERATO, J. R. **Desenvolvimento e avaliação do software QUANT para quantificação de doenças de plantas por análise de imagens**. 2003. 126 f. (Tese de Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

LIMA, C. J. G. S.; OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; OLIVEIRA, M. K. T.; OLIVEIRA-FILHO, M. K. T. Modelos matemáticos para estimativa de área foliar de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 1, p. 120-127, 2008.

LIU, X.; JIN, J.; HERBERT, S. J.; ZHANG, Q.; WANG, G. Yield components, dry matter, LAI and LAD of soybeans in Northeast China. **Field Crops Research**, v. 93, n. 1, p.85-93, jul. 2005.

LUCENA, L.R.R.; LEITE, M.L.M.V.; CRUZ, M.G.; SÁ-JÚNIOR, E.H. Estimativa da área foliar em *Urochloa mosambicensis* por dimensões foliares e imagens digitais. **Archivos de Zootecnia**, v. 67, n. 259, p. 408-413, 2018.

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, n. 2, p. 40-45, 2011.

MARSHALL, J.K. Methods of leaf area measurement of large and small leaf samples. **Photosynthetica**, v.2, p.41-47, 1968.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. **Projeções do agronegócio: Minas Gerais 2017 a 2027**: projeções de longo prazo. 3. ed. Disponível em: <http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Publicacoes/projecoes_2017_a_2027.pdf>. Acesso em: 01 set. 2019.

MISGANA, Z.; DABA, G.; DEBELA, A. Modeling Leaf Area Estimation for Arabica Coffee (*Coffea arabica* L.) Grown at Different Altitudes of Mana District, Jimma Zone. **American Journal of Plant Sciences**, v. 9, n. 6, p. 1292-1307, 2018.

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*, v. 64, n. 1, p. 15-24, 2005.

MORAIS, A. A. C.; SILVA, A. L. Valor nutritivo e funcional da soja. **Revista Brasileira de Nutrição Clínica**, v. 15, n. 2, p. 306-15, 2000.

NARDINO, M.; SOUZA, V. Q.; BUSANELLO, C.; BAHRY, C. A.; CARON, B. O.; ZIMMER, P. D.; SCHIMIDT, D. Desfolha artificial em estádios vegetativos e suas implicações a cultura da soja. **Magistra**, v. 27, n. 2, p. 199-207, 2015.

NOGUEIRA, A. P. O.; SEDIYAMA, T.; BARROS, H. B.; TEIXEIRA, R. C. Morfologia, crescimento e desenvolvimento. In: SEDIYAMA, T. (Ed.) **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecenas, 2009, p. 7-16.

OWEN, L. N.; CATCHOT A L.; MUSSER, F. R.; GORE J.; COOK, D. C; JACKSON, R.; ALLEN C. Impact of defoliation on yield of group IV soybeans in Mississippi. **Crop Protection**, v. 54, p. 206 - 212, 2013.

PADOVAN, M. P.; ALMEIDA, D. L.; GUERRA, J. G. M.; RIBEIRO, R. L. D. R.; NDIAYE, A. Avaliação de cultivares de soja, sob manejo orgânico, para fins de adubação verde e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1705-1710, 2002.

PEIXOTO, C. P.; CÂMARA, G. M. S.; MARTINS, M. C.; MARCHIORI, L. F. S.; GUERZONI, R. A.; MATTIAZZI, P. Épocas de semeadura e densidade de plantas de

- soja: I. Componentes da produção e rendimentos de grãos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 89-96, 2000.
- REIS, V. M.; OLIVEIRA, A. L. M.; BALDANI, V. L. D.; OLIVARES, F. L.; BALDANI, J. I. Fixação biológica de nitrogênio simbiótica e associativa. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006, p. 153-174.
- REZENDE, P. M.; ARRUDA-CARVALHO, E. Avaliação de cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] para o sul de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, 2007.
- RICHTER, G. L.; ZANON-JÚNIOR, A.; STRECK, N. A.; GUEDES, J. V. C.; KRÄULICH, B.; ROCHA, T. S. M.; WINCK, J. E. M.; CERA, J. C. Estimativa da área de folhas de cultivares antigas e modernas de soja por método não destrutivo. **Bragantia**, v. 73, n. 4, p. 416-425, 2014.
- SACHET, M. R.; PENSO, G. A.; PERTILLE, R. H.; GUERREZI, M. T.; CITADIN, I. Estimativa da área foliar de pessegueiro por método não-destrutivo. **Ciência Rural**, v. 45, n. 12, p. 2161-2163, 2015.
- SCHMILDT, E. R.; AMARAL, J. A. T.; SANTOS, J. S.; SCHMILDT, O. Allometric model for estimating leaf area in clonal varieties of coffee (*Coffea canephora*). **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 4, p. 740-748, 2015.
- SEDIYAMA, T. **Produtividade da soja**. Londrina: Ed. Mecenas, 2016. 310p.
- SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2015. 333p.
- SETIYONO, T.D.; WEISS, A.; SPECHT, J.E.; CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A. Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions. **Field Crops Research**, v. 108, n. 1, p.82-92, jul. 2008.
- SHOEMAKER, R. C.; SCHLUETER, J.; DOYLE, J. J. Paleopolyploidy and gene duplication in soybean and other legumes. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 9, n. 2, p. 104-109, 2006.
- SILVA, C. R.; SILVA, V. J.; ALVES-JUNIOR, J.; CARVALHO, H. P. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.3, p.281–288, 2012.
- SILVA, M. S.; NAVES, M. M. V.; OLIVEIRA, R. B.; LEITE, O. S. M. Composição química e valor proteico do resíduo de soja em relação ao grão de soja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 3, p. 571-576, 2006.
- SILVA, N. F.; FERREIRA, F. A.; FONTES, P. C. R.; CARDOSO, A. A. Modelos para estimar a área foliar de abóbora por meio de medidas lineares. **Ceres**, v. 45, n. 259, 2015.
- SILVA-AFONSO, R. F.; MARTINS, F. L. I.; SANTOS, E. A.; MACHADO, M. R. R.; MAGANO, D. A. Comparação entre métodos de estimativas de área foliar com SCILAB e QUANT aplicados ao limoeiro-cravo. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 8, n. 4, 2017.

SOOMER, K.J.; LANG, A.R.G. Comparative analysis of two indirect methods of measuring LAI as applied to minimal and spur pruned grapes vines. **Australian Journal Plant Physiology**, Melbourne, v.21, p.197-206, 1994.

SOUSA, L. F.; SANTOS, J. G. D.; ALEXANDRINO, E.; MAURICIO, R. M.; MARTINS, A. D.; SOUSA, J. T. L. Método prático e eficiente para estimar a área foliar de gramíneas forrageiras tropicais. **Archivos de Zootecnia**, v. 64, n. 245, p. 83-85, 2015

SOUZA, M.S; ALVES, S. S. V.; DOMBROSKI, J. L. D.; FREITAS, J. D. B; AROUCHA, E. M. M. Comparação de métodos de mensuração de área foliar para a cultura da melancia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 241-245, 2012.

SPSS. **Sigma Scan Pro 5.0**. 1998.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 820 p.

TARTAGLIA, F. L.; RIGHI, E. Z.; ROCHA, L.; LOOSE, L. H.; MALDANER, I. C.; HELDWEIN, A. B. Non-destructive models for leaf area determination in canola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 6, p. 551-556, 2016.

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, 199-203, 2002.

TORMEN, N. R.; SILVA, F. D. L.; DEBORTOLI, M. P.; UEBEL, J. D.; FÁVERA, D. D.; BALARDIN, R. S. Deposição de gotas no dossel e controle químico de *Phakopsora pachyrhizi* na soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, 2012.

USDA. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Crop Production 2018 Summary. February 2019. United States Department of Agriculture. 2019. Disponível em: <https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays_Reports/reports/cropan19.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2019.

WEISS, M.; BARET, F.; SMITH, G.J.; JONCKHEERE, I.; COPPIN, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. **Agricultural And Forest Meteorology**, v. 121, n. 1-2, p.37-53, 2004.

WELLS, R. Dynamics of soybean growth in variable planting patterns. **Agronomy Journal**, Madison, v. 1, n. 81, p. 44-48, 1993.

WELLS, R. Soybean growth response to plant density: relationships among photosynthesis, leaf area, and light interception. **Crop Science**, Madison, v. 31, n. 3, p. 755- 756, 1991.

YOUNG, V. R. Soy protein in relation to human protein and amino acid nutrition. **Journal of the American Dietetic Association**, v. 91, n. 7, p. 828-835, 1991.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; RICHTER, G. L.; BECKER, C. C.; ROCHA, T. S. M.; CERA, J. C.; WINCK, J. E. M.; CARDOSO, A. P.; TAGLIAPIETRA, E. L.; WEBER, P. S. Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, v. 74, n. 3, p.279-290, 21 jul. 2015.

ZEIST, A. R.; OLIVEIRA, J. R. F.; LIMA-FILHO, R. B.; SILVA, M. L. S.; RESENDE, J. T. V. Comparação de métodos de estimativa de área foliar em morangueiro. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 20, n. 1/2, p. 33-41, 2014.