



Modelos alométricos para determinação da área foliar de cacaueteiro 'PH-16' em sombreamento e pleno sol

Allometric models for determining leaf area in the 'PH-16' cocoa tree in the shade and in full sun

Edilson Romais Schmildt¹, Evelyn Trevisan², Marcel Belique³, Omar Schmildt^{4*}

Resumo: Objetivou-se com este trabalho estudar a modelagem estatística da área foliar de cacaueteiro (*Theobroma cacao* L. 'PH-16'), em ambiente sombreado e a pleno sol. Coletaram-se aleatoriamente 200 folhas de cacaueteiro (100 foram de plantas em cultivo sombreado e 100 em cultivo a pleno sol), situadas em lavouras cacaueteiras no município de Linhares (ES), para estudo de suas medidas lineares. As folhas foram separadas em dois grupos, um para estimativa das equações e outro para validação dessas equações. Todas as folhas foram caracterizadas quanto ao comprimento (C), largura (L) e área foliar. A estimativa da área foliar foi feita pelos modelos linear, potência e exponencial, a partir das medidas de C, L e CL, como variáveis independentes. Na validação das equações obtidas, avaliou-se também a equação proposta por Azomaning e Lockard. Há diferença na morfologia foliar de cacau cultivado na sombra e em pleno sol, no entanto, o ambiente não afeta estatisticamente o intercepto dos modelos linear e potência, justificando a modelagem pelo uso conjunto de folhas dos dois ambientes. É possível estimar a área foliar do cacau a partir de equações alométricas, sendo mais precisas as equações que usam como variável explicativa o produto CL. A equação com modelo potência $AFE = 0,6736 (CL)^{1,0036}$ é a mais indicada para estimar a área foliar de cacau 'PH-16', podendo ser usada tanto para folhas de plantas em ambiente sombreado quanto a pleno sol.

Palavras-chave: Determinação não destrutiva. Ecofisiologia. Sistema de cultivo. *Theobroma cacao* L.

Abstract: The aim of this work was to study the statistical modelling of leaf area in the cocoa tree (*Theobroma cacao* L. 'PH - 16'), in a shaded environment and in full sun. Two hundred leaves (100 from plants grown in the shade and 100 grown in full sun) were randomly collected from cocoa plants in plantations in the city of Linhares in the State of Espírito Santo, Brazil, to study their linear measurements. The leaves were separated into two groups, one to estimate the equations and the other to validate the equations. All leaves were characterised for length (C), width (L) and leaf area. Leaf area was estimated by linear, power and exponential models from the measurements of C, L and CL as independent variables. When validating the equations, the equation proposed by Azomaning and Lockard was also evaluated. There is a difference in leaf morphology between cocoa grown in the shade and in full sun, however the environment does not statistically affect the intercept in the linear and power models, justifying modelling from the joint use of leaves of the two environments. It is possible to estimate leaf area in the cocoa plant from allometric equations, with the equations that use the product of CL as the explanatory variable being more precise. The power model equation $AFE = 0.6736 (LW)^{1.0036}$ is best suited for estimating leaf area in 'PH-16' cocoa, and can be used both for the leaves of plants in shaded environments and in full sun.

Key words: Non-destructive determination. Ecophysiology. Cultivation system. *Theobroma cacao* L.

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 18/10/2016 e aprovado em 17/03/2017

¹Eng. Agrônomo, D.Sc., Prof. Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas, CEUNES/UFES, São Mateus - ES, e-mail: e.romais.s@gmail.com

²Eng^a. Agrônoma, Mestranda em Agricultura Tropical, Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, CEUNES/UFES, São Mateus - ES, e-mail: evelyntrevisan@gmail.com

³Eng. Agrônomo, Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas, CEUNES/UFES, São Mateus - ES, e-mail: marcelbelique.work@hotmail.com

⁴Eng. Agrônomo, D.Sc. Bolsista PNPd/CAPES, Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, CEUNES/UFES, São Mateus - ES, e-mail: omarschmildt@gmail.com

INTRODUÇÃO

O cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.), família Sterculiaceae (DIAS, 2001), é uma planta perene de grande importância econômica, principalmente como matéria-prima para a fabricação de chocolate. O cultivo do cacauzeiro que era feito tradicionalmente em ambiente sombreado em matas, vem se destacando como monocultivo a pleno sol, o que exige novas pesquisas, pois a ecofisiologia do cacauzeiro se mostra diferente nos dois tipos de ambiente (ALMEIDA; VALLE, 2007).

De acordo com Sena (2011), o auge da produção brasileira de cacau foi em 1986, com 459 mil toneladas. Nessa época, o Brasil era o segundo maior produtor e representava 22% da produção mundial de cacau. O surgimento da vassoura-de-bruxa em 1989, no sul da Bahia, provocou queda de produção e até perda total em algumas áreas produtivas (PEREIRA, 1989). Nesse contexto, surgiram algumas alternativas para a recuperação da lavoura cacauzeira, dentre elas, a adoção de cultivares resistentes à vassoura-de-bruxa, a partir de 1990 (PEREIRA, 2001). Nos últimos anos, foram disponibilizadas várias cultivares, como o clone autocompatível PH-16 (MANDARINO; SENA GOMES, 2009).

O conhecimento da área foliar é fundamental na avaliação do crescimento e desenvolvimento de plantas, em virtude de estar ligado ao incremento de matéria seca, o que permite avaliar intensidade de transpiração, taxa assimilatória líquida, razão de área foliar, área foliar específica e índice de área foliar (PEIXOTO *et al.*, 2011).

A medição da área foliar pode ser feita de forma direta, destrutiva ou não, e de forma indireta, não destrutiva (SCHMILDT *et al.*, 2014). Para determinar a área foliar diretamente, em geral, todas as folhas da planta são coletadas, caracterizando o método como destrutivo e de elevada mão de obra (TOEBE *et al.*, 2012), além da destruição das folhas, que compromete o desenvolvimento normal da planta, dificultando o acompanhamento do desenvolvimento do ciclo da cultura no campo (MALAGI *et al.*, 2010). A medição da área foliar de forma direta não destrutiva, apesar de ser fácil, depende de equipamentos geralmente caros (ILKAEI *et al.*, 2011), enquanto que os métodos indiretos e não-destrutivos permitem avaliações sucessivas em uma mesma planta, além de rapidez nas avaliações (TOEBE *et al.*, 2012).

O desenvolvimento de modelos de regressão estatística a partir de medições lineares de folhas para prever a área foliar individual tem se mostrado muito útil no estudo do crescimento e desenvolvimento de plantas (ACHTEN *et al.*, 2010; MALAGI *et al.*, 2010).

A modelagem estatística a partir de medidas alométricas das folhas tem sido investigada para diversas culturas, como mucuna cinza (CARGNELUTTI *et al.*, 2012), feijão de porco (TOEBE *et al.*, 2012), maracujazeiro (MORGADO *et al.*, 2013), cafeeiro (SCHMILDT *et al.*, 2014), abacaxi (FRANCISCO *et al.*, 2014), mangueira (SILVA *et al.*, 2015) e macadâmia (SCHMILDT *et al.*, 2016).

Atualmente, os únicos estudos para determinação de área foliar por método não destrutivo em cacauzeiro são o artigo de Asomaning e Lockard (1963), que trabalharam com a cultivar Amelonado e estudaram apenas o comprimento de folhas no modelo potência, e o artigo de Santos *et al.* (2014), que também não fizeram estudo de modelagem da área foliar, tendo como foco a comparação de metodologias de obtenção da área foliar.

Ante a importância do recurso de determinação de área foliar não destrutivo por medidas planas, a alta aplicabilidade do método e a carência de tal ferramenta para o cacau, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência do ajuste de diferentes modelos estatísticos, para determinação da área foliar de plantas de cacau cultivar PH-16, em ambiente sombreado sob mata nativa e a pleno sol, com o uso do comprimento e/ou a largura das folhas como variáveis independentes.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o estudo da área foliar por modelo alométrico foram coletadas 200 folhas, intactas, de plantas de cacauzeiro *Theobroma cacao* L. cultivar PH-16, sendo 100 folhas no ambiente sombreado por mata e 100 folhas no ambiente a pleno sol. As folhas foram coletadas aleatoriamente, com tamanhos diversificados, no máximo 10 folhas por planta, visando representar todos os tamanhos presentes. As coletas de folhas sombreadas foram realizadas na fazenda Esperança, em plantas cultivadas sob espaçamento 3,0 x 3,0m, ao passo que as folhas a pleno sol foram coletadas na fazenda Tropical, em plantas manejadas sob espaçamento 3,7 x 2,0m. Ambas as fazendas situam-se no município de Linhares (ES), e as coletas foram conduzidas em fevereiro de 2013, quando as lavouras estavam com cinco anos de idade.

As folhas coletadas foram acondicionadas em sacos plásticos identificados e, posteriormente, transferidas para laboratório. Para todas as folhas coletadas em cada ambiente de cultivo, fizeram-se medições referentes às maiores larguras (L, em cm), na posição mediana do limbo, perpendicularmente às linhas dos maiores comprimentos, bem como os comprimentos (C, em cm) sobre a nervura principal, considerando o ponto de inserção do limbo no pecíolo até o ápice. Para tanto, utilizou-se uma régua graduada em milímetros (mm). Com os dados de C e L, determinou-se também o produto entre C e L (CL, em cm²). Em seguida, para cada folha devidamente identificada, determinou-se a área foliar observada (AFO, em cm²), por intermédio de imagens digitais em scanner HP Deskjet F4480 e processamento dessas imagens pelo Software ImageJ®, de domínio público (COLLINS, 2007).

As 100 folhas colhidas de plantas em ambiente sombreado e as 100 coletadas em ambiente a pleno sol foram separadas em dois grupos, um com 75 folhas para estimativa das equações e outro com 25 folhas para

validação das equações. Folhas de ambos os ambientes e grupos foram caracterizadas por medidas de tendência central e variabilidade para C, L, CL, AFO e relação entre comprimento e largura (C/L), conforme Zhang e Liu (2010), na determinação de área foliar de *Bergenia purpurascens* em diversos ambientes. Realizou-se também o teste t de Student na comparação entre as médias para os dois ambientes.

Para modelar a AFO em função do C, da L ou do comprimento vezes a largura (CL) como variáveis independentes (x_i), obtiveram-se equações para área foliar estimativa (AFE) nos modelos de regressão linear ($AFE = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$), potência ($AFE = \hat{\beta}_0 x^{\hat{\beta}_1}$) e exponencial ($AFE = \hat{\beta}_0 \hat{\beta}_1^x$), com respectivos coeficientes de determinação (R^2), aplicados a folhas coletadas no ambiente sombreado e a pleno sol, totalizando 18 equações estimadas. Os parâmetros β_0 e β_1 foram estimados pelo método dos mínimos quadrados, sendo realizado previamente a linearização das funções potência e exponencial.

A validação das equações de estimativa de área foliar foi realizada com base nos valores estimados pelo modelo (AFE) e os valores observados (AFO) em folhas retiradas de plantas no ambiente sombreado ($n = 25$ folhas) e em plantas no ambiente a pleno sol ($n = 25$ folhas). Para cada equação, de cada modelo, inicialmente, foi ajustada uma regressão linear simples ($AFE = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 AFO$). Foram testadas as hipóteses $H_0 : \beta_0 = 0$ versus $H_a : \beta_0 \neq 0$ e $H_0 : \beta_1 = 1$ versus $H_a : \beta_1 \neq 1$, por meio do teste t de Student a 5% de probabilidade de erro. Posteriormente, determinou-se o erro absoluto médio (EAM) e a raiz do quadrado médio do erro (RQME), dados por:

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |AFE - AFO|}{n}, \quad RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (AFE - AFO)^2}{n}}$$

Em que: AFE e AFO como definidos anteriormente; n é o número de folhas usadas na validação, 25 para cada ambiente.

Para validação, avaliou-se também a equação do modelo potência $AFE = 0,3199x_i^{1,9040}$ proposto por Asomaning e Lockard (1963), que usa o C como variável independente. Os critérios utilizados para a seleção das equações que melhor estimam a área foliar em função de C, L ou CL foram o coeficiente linear (β_0) não diferente de zero, coeficiente angular (β_1) não diferente de um, EAM e RQME mais próximos de zero.

A verificação da possibilidade de uso de uma única equação de cada modelo para folhas de ambos ambientes, sombreado e a pleno sol, foi feita por meio da análise de covariância (ZHANG; LIU, 2010; SCHMILDT *et al.*, 2017), em que se verificou se o ambiente tem efeito na inclinação ($\hat{\beta}_1$). Para os casos em que o ambiente não teve efeito em $\hat{\beta}_1$, estimou-se equação usando os dois ambientes

conjuntamente. A validação das novas equações foi feita com uso das 50 folhas usadas anteriormente, ou seja, 25 folhas de cada ambiente. Os critérios de validação foram os mesmos usados para validação de cada ambiente isoladamente.

As análises estatísticas foram realizadas com auxílio dos softwares Microsoft Office Excel (LEVINE *et al.*, 2012), Genes (CRUZ, 2013), e R (R CORE TEAM, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As folhas apresentaram considerável variabilidade, computada para comprimento (C), máxima largura (L), produto comprimento vezes largura (CL) e área foliar observada (AFO). A variabilidade foi maior para as folhas usadas na obtenção das equações (amostra de 75 folhas), comparativamente às folhas usadas para validação dos modelos (amostra de 25 folhas) (Tabela 1).

Elevados valores de amplitude são importantes para trabalhos que procuram representar a área foliar por modelos estatísticos por intermédio da análise de regressão. Levine *et al.* (2012) esclarecem que, ao se usar modelos de regressão para estimativas, os valores da variável independente, que se quer estimar, não devem extrapolar os valores utilizados na construção da equação de regressão. Portanto, esse requisito foi atendido neste estudo para o uso de L, C e CL, como variáveis independentes.

Não houve diferença significativa entre as médias para C, entre os ambientes de cultivo, no entanto a L, o CL e a AFO foram maiores para folhas coletadas em ambiente a pleno sol (Tabela 1). A relação entre comprimento e largura (C/L) foi estatisticamente superior para as médias no ambiente sombreado. Outros trabalhos, com outras espécies, abordam a comparação da área foliar entre plantas nos ambientes sombreado e a pleno sol, mostrando que as plantas, via de regra, apresentam diferenças de área foliar entre os dois ambientes (ROSSATO *et al.*, 2010; RABELO *et al.*, 2012).

Rabelo *et al.* (2012), ao trabalhar com a espécie arbórea *Alseis pickelii* na Mata Atlântica verificaram que a área foliar pode ser maior tanto na sombra quanto no sol, dependendo da exploração da área. Assim, detectaram que folhas do setor preservado da mata apresentavam maior área foliar na sombra do que no sol e, o oposto ocorreu quando se avaliaram as folhas em parte explorada da floresta. Os resultados encontrados para área foliar por Rabelo *et al.* (2012), assim como no presente estudo com cacaueteiro PH-16, mostram a habilidade das espécies em utilizar a radiação fotossinteticamente ativa e alocar os fotoassimilados em resposta a um ambiente particular de luminosidade (DIAS-FILHO, 1997).

Na avaliação das medidas alométricas, observa-se que os melhores ajustes foram para as medidas de CL,

Tabela 1 – Tamanho de amostra (n), média, mínimo, máximo, amplitude total (AT), coeficiente de variação (CV%) e desvio padrão (DP) para comprimento (C), maior largura (L), produto comprimento vezes a maior largura (CL), área foliar observada (AFO) e relação C/L em folhas de cacaueteiro ‘PH-16’ colhidas em plantas em ambiente sombreado e a pleno sol, usadas para estimação e para validação de equações

Table 1 - Sample size (n), mean, minimum, maximum, full amplitude (AT), coefficient of variation (CV%), standard deviation (DP) for length (C), greatest width (L), the product of length times greatest width (CL), observed leaf area (AFO), and the C/L ratio in leaves of ‘PH-16’ cocoa, harvested from plants in the shade and in full sun, used to estimate and validate the equations

EST	C (cm)		L (cm)		CL (cm ²)		AFO (cm ²)		C/L	
	SB	PS	SB	PS	SB	PS	SB	PS	SB	PS
Folhas usadas para estimação das equações										
n	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Média ⁽¹⁾	27,96a	27,73a	7,90b	10,23a	240,08b	294,64a	164,70b	203,64a	3,55a	2,72b
Mínimo	11,40	14,11	3,20	5,40	36,50	88,60	25,80	49,70	2,52	1,79
Máximo	44,30	45,00	12,80	15,50	559,40	697,50	381,00	475,70	4,35	3,79
AT	32,90	30,90	9,60	10,10	522,90	612,90	555,20	426,00	1,83	2,00
CV%	30,95	23,58	30,27	20,70	55,93	41,59	56,14	42,69	10,98	13,09
DP	8,65	6,54	2,39	2,12	134,27	122,55	92,46	86,93	0,39	0,36
Folhas usadas para validação das equações										
N	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Média ⁽¹⁾	28,83a	28,74a	8,06b	10,53a	249,68b	312,20a	169,74b	217,33a	3,61a	2,73b
Mínimo	13,70	17,70	3,80	7,30	52,10	132,80	38,40	89,20	2,92	2,36
Máximo	41,40	40,50	13,10	13,80	553,80	526,50	376,90	358,80	4,28	3,38
AT	27,70	22,80	9,30	6,50	483,70	393,70	338,50	269,60	1,36	1,02
CV%	28,66	20,13	29,75	18,22	52,61	36,07	52,73	35,34	11,60	9,04
DP	8,26	5,78	2,40	1,92	131,36	112,60	89,51	76,80	0,42	0,25

⁽¹⁾médias entre ambiente sombreado e pleno sol, seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste t. EST – Estatística; SB – Sombreamento; PS – Pleno sol.

⁽¹⁾mean values between the shaded environment and full sun followed by the same letter do not differ at 5% probability by t-test. EST - Statistics; SB - Shading; PS - Full sun.

tanto nas folhas do ambiente sombreado quanto a pleno sol, assegurando coeficientes de determinação (R^2) com valores de até 0,9959 (Tabela 2). Os resultados alcançados neste trabalho estão em conformidade com as regressões mais representativas da estimativa da área foliar, as quais envolveram o produto CL (SEDAR; DEMIRSOY, 2006; PEKSEN, 2007; TSIALTAS *et al.*, 2008; SCHMILDT *et al.*, 2014). Não obstante, em outros trabalhos, os melhores resultados ocorreram com a maior largura do limbo foliar (CARGNELUTTI FILHO *et al.*, 2012; TOEBE *et al.*, 2012) ou com o maior comprimento ao longo da nervura principal (POSSE *et al.*, 2009).

Quanto aos modelos matemáticos, observou-se que de maneira geral, o linear e o potência, que relacionam CL, devem ser preferidos em relação ao modelo exponencial, pois apresentam maiores valores de R^2 , tanto para as folhas sombreadas quanto a pleno sol (Tabela 2). Esse resultado é

reforçado com base nos indicadores usados para a validação dos modelos (Tabela 3), no qual observou-se que houve maior precisão dos modelos linear e potência que utilizam o CL na estimação da área foliar, com coeficiente linear não diferente de zero, coeficientes angular não diferente de um, coeficiente de determinação (R^2) mais próximos de 1,00 e menores valores para erro absoluto médio (EAM) e raiz do quadrado médio do erro (RQME).

O modelo tipo potência a partir do comprimento do limbo foliar segundo Asomaning e Lockard (1963) para o cacaueteiro ‘Amelonado’ não se mostrou adequado para ajuste da área foliar de ‘PH-16’. Apesar de apresentar coeficiente linear não diferente de zero e coeficientes angular não diferente de um, apresentou os mais altos valores para EAM e RQME, tanto no ambiente sombreado quanto a pleno sol. Esses resultados mostram que os critérios de validação são complementares na seleção das melhores equações de

Tabela 2 – Equações para a determinação da área foliar estimada (AFE), utilizando o comprimento (C), a largura (L) e o produto comprimento vezes largura (CL) como variáveis independentes (x_i) e coeficiente de determinação (R^2) para estimativa das equações de cacaueteiro 'PH-16' cultivado a sombra e em pleno sol

Table 2 - Equations for determining estimated leaf area (AFE) using the length (C), width (L) and the product of length times width (CL) as independent variables (x_i) and coefficient of determination (R^2) for estimating equations in 'PH-16' cocoa grown in the shade and in full sun

Modelo	x_i	Equação ⁽¹⁾	R^2
75 folhas colhidas em plantas cultivadas à sombra			
Linear: $AFE = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i$ $H_0 : \beta_1 = 0$ vs $H_a : \beta_1 \neq 0$	C	$AFE = -124,3300 + 10,337^{**}x_i$	0,9359
	L	$AFE = -130,1600 + 37,2800^{**}x_i$	0,9315
	CL	$AFE = -1,132 + 0,6865^{**}x_i$	0,9938
Potência: $AFE = \hat{\beta}_0 x_i^{\hat{\beta}_1}$ $H_0 : \beta_1 = 0$ vs $H_a : \beta_1 \neq 0$	C	$AFE = 0,2589x_i^{1,9128^{**}}$	0,9682
	L	$AFE = 2,6471x_i^{1,9555^{**}}$	0,9668
	CL	$AFE = 0,7033x_i^{0,9953^{**}}$	0,9959
Exponencial: $AFE = \hat{\beta}_0 \hat{\beta}_1^{x_i}$ $H_0 : \beta_1 = 0$ vs $H_a : \beta_1 \neq 0$	C	$AFE = 17,9010 (1,0755^{**})^{x_i}$	0,9325
	L	$AFE = 17,1270 (1,3007^{**})^{x_i}$	0,9310
	CL	$AFE = 45,4260 (1,0046^{**})^{x_i}$	0,8961
75 folhas colhidas em plantas cultivadas a pleno sol			
Linear: $AFE = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i$ $H_0 : \beta_1 = 0$ vs $H_a : \beta_1 \neq 0$	C	$AFE = -149,8300 + 12,7460^{**}x_i$	0,9192
	L	$AFE = -175,4900 + 37,0730^{**}x_i$	0,8149
	CL	$AFE = -2,9259 + 0,7011^{**}x_i$	0,9769
Potência: $AFE = \hat{\beta}_0 x_i^{\hat{\beta}_1}$ $H_0 : \beta_1 = 0$ vs $H_a : \beta_1 \neq 0$	C	$AFE = 0,4679x_i^{1,8156^{**}}$	0,9211
	L	$AFE = 2,2074x_i^{1,9246^{**}}$	0,8741
	CL	$AFE = 0,6102x_i^{1,0214^{**}}$	0,9819
Exponencial: $AFE = \hat{\beta}_0 \hat{\beta}_1^{x_i}$ $H_0 : \beta_1 = 0$ vs $H_a : \beta_1 \neq 0$	C	$AFE = 31,5080 (1,0660^{**})^{x_i}$	0,8794
	L	$AFE = 25,2690 (1,2153^{**})^{x_i}$	0,9769
	CL	$AFE = 66,9000 (1,0035^{**})^{x_i}$	0,9061

^{(1)**} $\hat{\beta}_1$ difere de zero, pelo teste t, ao nível de 1% de probabilidade.

^{(1)**} $\hat{\beta}_1$ differs from zero by t-test at 1% probability.

ajuste e devem ser usados conjuntamente, como também observado por Schmidt *et al.* (2014) no ajuste da área foliar de variedades de cafeeiro arábica.

A análise de covariância mostrou que o ambiente não tem efeito no intercepto (β_1) do modelo linear simples para L ($p = 0,9292$) e para CL ($p = 0,2910$) e do modelo potência para C ($p = 0,1869$), L ($p = 0,7340$) e CL (0,1230). Para esses casos, determinaram-se novas equações de estimativa da área foliar usando conjuntamente as folhas coletadas em ambiente sombreado e a pleno sol. As cinco equações e os seus respectivos R^2 são apresentadas na Tabela 4. Assim como, nas equações obtidas para cada ambiente isolado (Tabela 2), os melhores ajustes, para a análise conjunta dos ambientes, foram para os modelos linear e potência, que usam CL como medida alométrica.

A Tabela 5 ilustra a validação das equações apresentadas na Tabela 4, para uso conjunto dos ambientes. Pelos

critérios adotados, verifica-se que o melhor ajuste foi para o modelo potência, com coeficiente linear não diferente de zero, coeficientes angular não diferente de um, R^2 mais próximos de um e menor valor para erro absoluto médio (EAM) e para a raiz do quadrado médio do erro (RQME).

No presente estudo, a equação de regressão que melhor representa a estimativa da área foliar para o cacaueteiro 'PH-16', tanto em ambiente sombreado quanto a pleno sol, foi o modelo potência $AFE = 0,6736 (CL)^{1,0036^{**}}$. O estabelecimento dessa relação envolveu análises destrutivas das folhas. Deve-se ressaltar que a retirada ou destruição de folhas fez-se necessário apenas para a determinação das relações alométricas. Uma vez estabelecida a equação, a área foliar das plantas de cacaueteiro 'PH-16' pode ser estimada em outros estudos sem destacar-se as folhas, ou seja, por meio de régua ou trena para obtenção do maior comprimento e a maior largura do limbo foliar.

Tabela 3 – Variáveis independentes (x_i), constante ($\hat{\beta}_0$), intercepto ($\hat{\beta}_1$), coeficiente de determinação (R^2), obtidos na regressão ajustada entre a área foliar estimada (variável dependente) e a observada (variável independente), erro absoluto médio (EAM), raiz do quadrado médio do erro (RQME) calculados com base nas áreas foliares estimada e observada de 25 folhas de cacaueteiro 'PH-16' cultivado a sombra e em pleno sol

Table 3 - Independent variables (x_i), constants ($\hat{\beta}_0$), intercepts ($\hat{\beta}_1$), coefficient of determination (R^2) obtained in the regression adjusted between the estimated leaf area (dependent variable) and the observed (independent variable), mean absolute error (EAM), root mean square error (RQME) calculated based on estimated leaf area and observed 25 cocoa leaves 'PH-16' grown in shade and in full sun

Modelo	x_i	$\hat{\beta}_0^{(1)}$	$\hat{\beta}_1^{(2)}$	R^2	EAM	RQME
25 folhas colhidas em plantas cultivadas à sombra						
Linear	C	20,3565 ^{ns}	0,9032 ^{ns}	0,8958	22,4848	14,2918
Linear	L	4,5760 ^{ns}	0,9556 ^{ns}	0,9549	16,2152	9,3652
Linear	CL	0,9021 ^{ns}	1,0038 ^{ns}	0,9927	5,6087	3,8474
Potência	C	15,826 ^{ns}	0,9176 ^{ns}	0,9200	19,5818	12,4396
Potência	L	-3,9444 ^{ns}	1,0189 ^{ns}	0,9603	14,5054	9,1303
Potência	CL	-1,8906 ^{ns}	1,0246 ^{ns}	0,9928	5,7987	4,1316
Exponencial	C	-0,0499 ^{ns}	1,0101 ^{ns}	0,9182	20,2730	13,2511
Exponencial	L	-34,0032*	1,2151*	0,8877	25,2268	21,2019
Exponencial	CL	-37,5971*	1,2328*	0,8990	27,4052	20,8171
Potência AL ⁽³⁾	C	19,6770 ^{ns}	1,0956 ^{ns}	0,9199	37,6281	23,2601
25 folhas colhidas em plantas cultivadas a pleno sol						
Linear	C	14,3488 ^{ns}	0,9301 ^{ns}	0,9385	14,0282	9,3473
Linear	L	22,0779 ^{ns}	0,8875*	0,9181	15,9174	10,8961
Linear	CL	-5,8728 ^{ns}	1,0207 ^{ns}	0,9859	6,7167	4,7056
Potência	C	4,3386 ^{ns}	0,9650 ^{ns}	0,9324	13,9239	9,9952
Potência	L	16,3240 ^{ns}	0,8950 ^{ns}	0,9198	16,7241	11,1786
Potência	CL	-7,2488 ^{ns}	1,0260 ^{ns}	0,9857	6,9456	4,8101
Exponencial	C	-3,3640 ^{ns}	0,9874 ^{ns}	0,8996	18,4337	12,7899
Exponencial	L	2,7912 ^{ns}	0,9553 ^{ns}	0,9069	18,6704	12,1431
Exponencial	CL	-26,0400*	1,1080 ^{ns}	0,9445	16,5986	10,9656
Potência AL ⁽³⁾	C	-4,8768 ^{ns}	0,9327 ^{ns}	0,9308	21,1707	13,8935

⁽¹⁾ * Constante difere de zero, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade. ns Não-significativo.

⁽²⁾ * Intercepto difere de um, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade. ns Não-significativo.

⁽³⁾ Equação $\hat{Y}_i = 0,3199x_i^{1,9040}$ proposta por Asomaning e Lockard (1963).

⁽¹⁾ * Constants differs from zero, the t test at the level of 5% probability. ns non-significant.

⁽²⁾ * Intercepts differs from one, by t test, at the level of 5% probability. ns non-significant.

⁽³⁾ Equation $\hat{Y}_i = 0.3199x_i^{1.9040}$ proposed by Asomaning and Lockard (1963).

Tabela 4 – Equações para a determinação da área foliar estimada (AFE), utilizando medidas de comprimento (C), largura (L) e o produto comprimento vezes largura (CL) como variável independente (x_i) e coeficiente de determinação (R^2), com base em 150 folhas de cacau 'PH-16' retiradas de plantas cultivadas a sombra (75 folhas) e a pleno sol (75 folhas)

Table 4 - Equations to determine estimated leaf area (AFE), using measurements of length (C), width (L) and the product of length times width (CL) as the independent variable (x_i) and coefficient of determination (R^2), based on 150 leaves of 'PH-16' cocoa from plants grown in the shade (75 leaves) and in full sun (75 leaves)

Modelo	x_i	Equação ⁽¹⁾	R^2
75 folhas colhidas em plantas cultivadas à sombra			
Linear: AFE = $\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i$	L	AFE = - 114,1611 + 32,8994** x_i	0,8295
$H_0 : \beta_1 = 0$ vs $H_a : \beta_1 \neq 0$	CL	AFE = - 1,384 + 0,6940** x_i	0,9864
Potência: AFE = $\hat{\beta}_0 x_i^{\hat{\beta}_1}$	C	AFE = 0,3151 $x_i^{1,8943}$ **	0,8644
$H_0 : \beta_1 = 0$ vs $H_a : \beta_1 \neq 0$	L	AFE = 3,5460 $x_i^{1,7617}$ **	0,8358
	CL	AFE = 0,6736 $x_i^{1,0036}$ **	0,9864

^{(1)**} $\hat{\beta}_1$ difere de zero, pelo teste t, ao nível de 1% de probabilidade.

^{(1)**} $\hat{\beta}_1$ differs from zero, the t test at 1% probability.

Tabela 5 – Variáveis independentes (x_i), constante ($\hat{\beta}_0$), intercepto ($\hat{\beta}_1$), coeficiente de determinação (R^2), obtidos na regressão ajustada entre a área foliar estimada (variável dependente) e a observada (variável independente), erro absoluto médio (EAM), raiz do quadrado médio do erro (RQME) calculados com base nas áreas foliares estimada e observada de 50 folhas de cacau 'PH-16' cultivado a sombra e em pleno sol

Table 5 - Independent variables (x_i), constants ($\hat{\beta}_0$), intercepts ($\hat{\beta}_1$), coefficient of determination (R^2) obtained in the regression adjusted between the estimated leaf area (dependent variable) and the observed (independent variable), mean absolute error (EAM), root mean square error (RQME) calculated based on estimated leaf area and observed 50 cocoa leaves 'PH-16' grown in shade and in full sun

Modelo	x_i	$\hat{\beta}_0$ ⁽¹⁾	$\hat{\beta}_1$ ⁽²⁾	R^2	EAM	RQME
Linear	L	17,6613 ^{ns}	0,8988*	0,8923	23,3871	27,9990
Linear	CL	0,9174 ^{ns}	1,0050 ^{ns}	0,9898	6,2087	8,7068
Potência	C	20,8362 ^{ns}	0,8855 ^{ns}	0,8220	29,9500	36,4251
Potência	L	11,5176 ^{ns}	0,9150 ^{ns}	0,8980	21,9962	27,6661
Potência	CL	-0,1245 ^{ns}	0,9987 ^{ns}	0,9898	6,1264	8,6553

^{(1)ns} Constante não difere de zero, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade.

^{(2)*} Intercepto difere de um, pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade. ns Não-significativo.

^{(1)ns} Constants no differs from zero, the t test at the level of 5% probability.

^{(2)*} Intercept differs from a, t test, at the level of 5% probability. ns non-significant.

CONCLUSÕES

É possível estimar a área foliar do cacau a partir de equações alométricas, com maior precisão nas que utilizam o produto entre o comprimento e a maior largura (CL) como variável explicativa;

O modelo matemático AFE = 0,6736 (CL)^{1,0036**} é o mais indicado para estimativa da área foliar de cacau 'PH-16' e pode ser usado tanto para folhas de plantas sombreadas quanto a pleno sol.

LITERATURA CIENTÍFICA CITADA

- ACHTEN, W.M.J.; MAES, W.H.; REUBENS, B.; MATHIJS E.; SINGH, V.P.; VERCHOT, L.V.; MUYS, B. Biomass production and allocation in *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 5, p. 667-676, 2010.
- ALMEIDA, A.A.F.; VALLE, R.R. Ecophysiology of the cacao tree. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, p. 425-448, 2007.
- ASOMANING, E.J.A.; LOCKARD, R.G. Note on estimation of leaf areas of cocoa from leaf length data. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 43, p. 243-245, 1963.
- CARGNELUTTI FILHO, A. TOEBE, M.; BURIN, C.; FICK, A.L.; NEU, I.M.M.; FACCO, G. Estimação da área foliar de mucuna cinza por meio de método não destrutivo. **Ciência Rural**, v. 42, n. 2, p. 238-242, 2012.
- COLLINS, T.J. ImageJ for microscopy. **BioTechniques**, v.43, n.1 supplement, p. 25-30, 2007.
- CRUZ, C.D. GENES: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.
- DIAS-FILHO, M.B. Physiological response of *Solanum crinitum* Lam. to contrasting light environments. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 8, p. 789-796. 1997.
- DIAS, L.A.S. Origem e dispersão de *Theobroma cacao* L.: um novo cenário. In: DIAS, L.A.S. (ed.). **Melhoramento genético do cacauero**. Viçosa, MG: Funape, 2001. p. 81-127.
- FRANCISCO, J.P.; DIOTTO, A.V.; FOLEGATTI, M.V.; SILVA, L.D.B.; PIEDADE, S.M.S. Estimativa da área foliar do abacaxizeiro cv. Vitória por meio de relações alométricas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 2, p. 285-293, 2014.
- ILKAE, M.N.; PAKNEJAD, F.; ZAVAREH, M.; ARDAKANI, M.R.; KASHANI, A. Prediction Model of Leaf Area in Soybean (*Glycine max* L.). **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v. 6, n. 1, p. 110-113, 2011.
- LEVINE, D.M.; BERENSON, M.L.; KREHBIEL, T.C.; STEPHAN D. **Estatística: teoria e aplicações usando Microsoft Excel em português**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2012. 832p.
- MALAGI, G.; CITADIN, I.; SCARIOT S.; REIS, L. Método não destrutivo para determinação da área foliar da videira, cultivar BRS-Violeta. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 32, n. 4, p. 1250-1254, 2010.
- MANDARINO, E.P.; SENA GOMES, A.R. **Produtividade do cacauero (*Theobroma cacao* L.) cultivados em blocos monoclonais, no sul da Bahia, Brasil**. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC. Boletim Técnico n. 197, 2009. 32p.
- MORGADO, M.A.D.; BRUCKNER, C.H.; ROSADO, L.D.S.; ASSUNÇÃO, W.; SANTOS, C.E.M. Estimação da área foliar por método não destrutivo, utilizando medidas lineares das folhas de espécies de *Passiflora*. **Revista Ceres**, v. 60, n. 5, p. 662-667, 2013.
- PEIXOTO, C.P.; CRUZ, T.V.; PEIXOTO, M.F.S.P. Análise quantitativa do crescimento de plantas: conceitos e Prática. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, p. 51-76, 2011.
- PEKSEN, E. Non-destructive leaf area estimation model for faba bean (*Vicia faba* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 113, n. 4, p. 322-328, 2007.
- PEREIRA, A.B. Melhoramento clonal. In: DIAS, L.A.S. (ed.). **Melhoramento genético do cacauero**. Viçosa, MG: Funape, 2001. p. 361-384.
- PEREIRA, J.L.M.; RAM, A.; FIGUEIREDO, J.M.; ALMEIDA, L.C.C. Primeira ocorrência de vassoura-de-bruxa na principal região produtora de cacau do Brasil. **Agrotrópica**, v. 1, p. 79-81, 1989.
- POSSE, R.P.; SOUZA, E.F.; BERNARDO, S.; PEREIRA, M.G.; GOTTARDO, R.D. Total leaf area of papaya trees estimated by a nondestructive method. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 4, p. 462-466, 2009.
- RABELO, G.R.; KLEIN, D.E.; CUNHA, M. Does selective logging affect the leaf structure of a late successional species? **Rodriguésia**, v. 63, n. 2, p. 419-427, 2012.
- R CORE TEAM (2016). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>, Acesso em: 10 jul. 2016.
- ROSSATTO, D.R.; TAKAHASHI, F.S.C.; SILVA, L.C.R.; FRANCO, A.C. Características funcionais de folhas de sol e sombra de espécies arbóreas em uma mata de galeria no Distrito Federal, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 24, n. 3, p. 640-647, 2010.

SANTOS, S.N.; DIGAN, R.C.; AGUILAR, M.A.G.; SOUZA, C.A.S.; PINTO, D.G.; MARINATO, C.S.; ARPINI, T.S. 2014. Análise comparativa de métodos de determinação de área foliar em genótipos de cacau. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 411-419, 2014.

SCHMILDT, E.R.; AMARAL, J.A.T.; SCHMILDT, O.; SANTOS, J.S. Análise comparativa de equações para estimativa da área foliar em cafeeiros. **Coffee Science**, v. 9, n. 2, p. 155-167, 2014.

SCHMILDT, E.R.; HUESO, J.J.; PINILLOS, V.; STELLFELDT, A.; CUEVAS, J. Allometric models for determining leaf area of 'Fino de Jete' cherimoya grown in greenhouse and in the open field. **Fruits**, v. 72, n. 1, p. 24-30, 2017.

SCHMILDT, E.R.; OLIARI, L.S.; SCHMILDT, O.; ALEXANDRE, R.S.; BRUMATTI, J.A.; VIANA, D.G. Determinação da área foliar de macadâmia a partir de dimensões lineares do limbo foliar. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 10, n. 3, p. 209-216, 2016.

SEDAR, Ü; DEMIRSOY, H. Non-destructive leaf area estimation in chestnut. **Science Horticulturae**, v. 108, n. 2, p. 227-230, 2006.

SENA, J.V.C. Produção e efetivo do cacau no nordeste. **Informe Rural Etene**, ano 5, n.2, 2011. Disponível em: <http://www.bnb.gov.br/content/aplicacao/etene/etene/docs/ire_ano5_n2.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2014.

SILVA, S.F.; CABANEZ, P.A.; MENDONÇA, R. F.; PEREIRA, L.R.; AMARAL, J.A.T. Modelos alométricos para estimativa da área foliar de mangueira pelo método não destrutivo. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 9, n. 1, p. 86-90, 2015.

TOEBE, M.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BURIN, C.; FICK, A.L.; NEU, I.M.M.; CASAROTTO, G.; ALVES, B.M. Modelos para a estimação da área foliar de feijão de porco por dimensões foliares. **Bragantia**, v. 71, n. 1, p. 37-41, 2012.

TSIALTAS, J.T.; KOUNDOURAS, S.; ZIOZIOU, E. Leaf area estimation by simple measurements and evaluation of leaf area prediction models in Cabernet-Sauvignon grapevine leaves. **Photosynthetica**, v. 46, n. 3, p. 452-456, 2008.

ZHANG, L.; LIU, X.S. Non-destructive leaf-area estimation for *Berberia purpurascens* across timberline ecotone, southeast Tibet. **Annales Botanici Fennici**, v. 47, p. 346-352, 2010.