



Equações alométricas para estimativa da área foliar de espécies-chave da flora herbácea de florestas tropicais secas

Allometric equations for estimating leaf area of key herbaceous flora species in tropical dry forests

R. P. O. Nascimento¹; L. R. Sousa¹; C. G. R. Lopes¹; M. J. L. Medeiros²;
M. H. F. Farias³; B. A. S. Aguiar*¹

¹Centro de Ciências da Natureza (CCN), Universidade Federal do Piauí, 64049-550, Teresina-Piauí, Brasil

²Centro de Ciências da Educação (CCE), Curso de Educação no Campo, Universidade Federal do Piauí (UFPI), 64049-550, Teresina-Piauí, Brasil

³Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade (PPGBio), Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n - Dois Irmãos, 52171-900, Recife-Pernambuco, Brasil

*bruno_ayron@hotmail.com

(Recebido em 02 de maio de 2025; aceito em 22 de fevereiro de 2026)

As variações nas dimensões foliares são parâmetros que influencia a eficiência no processo fotossintético e respiração, fundamentais para o crescimento e a sobrevivência das plantas. A mensuração da área foliar (AF) pode ser realizada por métodos diretos, ou por modelos matemáticos alométricos baseados em dimensões lineares das folhas. Esses modelos são alternativas eficientes, não destrutivas, sendo aplicáveis em diferentes condições de campo. Este estudo visa desenvolver equações alométricas para estimativa da AF em espécies-chave da flora herbácea piauiense. Foram analisadas quatro espécies comuns na região: *Turnera subulata*, *Waltheria indica*, *Macroptilium lathyroides* e *Galinsoga parviflora*. A pesquisa foi conduzida em uma área preservada de Teresina, Piauí. Para estimar a AF, selecionamos 30 folhas saudáveis e completamente expandidas por espécie, medindo comprimento (C) e largura máxima (L). Em todas as espécies, independentemente do morfotipo foliar, a AF foi considerada como variável dependente no modelo, e a multiplicação das dimensões lineares “L*C” como variáveis explicativas. Submetemos as medidas à análise de regressão linear para obtenção dos modelos lineares. As equações geradas para as herbáceas, mostraram boa acurácia e foram validadas, podendo ser aplicadas com segurança em estudos que utilizarem as espécies. As variações morfométricas foliares indicaram plasticidade fenotípica sem comprometer a validade dos modelos matemáticos. Em *G. parviflora*, dois morfotipos sugerem influência genética ou ambiental, ressaltando a importância de considerar essas variações na coleta. Nosso estudo reforça a importância de incluir as herbáceas nos modelos alométricos em estudos florestais, já que essas espécies desempenham um papel-chave na dinâmica sucessional dos ecossistemas secos.

Palavras-chaves: modelos lineares, morfotipos foliares, ecossistemas secos.

Variations in leaf dimensions are key parameters influencing the efficiency of photosynthetic and respiratory processes, which are fundamental for plant growth and survival. Leaf area (LA) can be measured using direct methods or estimated through allometric mathematical models based on leaf linear dimensions. These models provide an efficient and non-destructive alternative applicable under various field conditions. This study aims to develop allometric equations for LA estimation in key herbaceous species of the Piauí flora. Four common species in the region were analyzed: *Turnera subulata*, *Waltheria indica*, *Macroptilium lathyroides*, and *Galinsoga parviflora*. The study was conducted in a preserved area of Teresina, Piauí. To estimate LA, we selected 30 healthy, fully expanded leaves per species, measuring their length (L) and maximum width (W). In all species, regardless of foliar morphotype, LA was considered the dependent variable in the model, while the multiplication of linear dimensions “L*W” served as the explanatory variable. The measurements were subjected to linear regression analysis to generate predictive models. The equations developed for these herbaceous species demonstrated high accuracy and were validated, making them reliable for use in studies involving these plants. Leaf morphometric variations indicated phenotypic plasticity without compromising the validity of the mathematical models. In *G. parviflora*, two morphotypes suggested genetic or environmental influence, emphasizing the importance of accounting for such variations during data collection. Our study highlights the relevance of including herbaceous species in allometric models for forest studies, given their key role in the successional dynamics of dry ecosystems.

Keywords: linear models, leaf morphotypes, dry ecosystems.

1. INTRODUÇÃO

A área foliar (AF) é um parâmetro morfofisiológico fundamental em estudos de fisiologia e ecologia vegetal, por estar diretamente relacionada ao crescimento das plantas. Isso porque a folha é o principal órgão responsável pela fotossíntese, processo essencial para o sequestro de CO₂ atmosférico e a fixação de carbono nos tecidos vegetais [1]. A depender das condições ambientais às quais está submetida, como luminosidade, temperatura, disposição de água, entre outras, uma planta pode alterar sua AF para se ajustar às adversidades do meio. Uma área foliar plástica é uma adaptação que permite que as plantas respondam às variações das condições ambientais, o que afeta diretamente a eficiência do uso de recursos e a sobrevivência das espécies [2]. Essas variações também afetam a estrutura e a função dos ecossistemas, pois as características foliares influenciam a composição das comunidades vegetais e a distribuição espacial das espécies no ambiente [2, 3].

Um importante parâmetro que utiliza os valores da AF é o Índice de Área Foliar (IAF), definido como a razão entre a área total de folhas e a área de solo projetada, é uma medida importante para estimar a densidade do dossel vegetal. Ele reflete a distribuição da superfície fotossintética das plantas e está relacionado às estratégias funcionais no espectro “rápido-lento”, que descreve como as plantas alocam recursos para maximizar o uso de luz e outros recursos ambientais [3].

A AF pode ser determinada por meio de equipamentos de alta precisão e elevado custo ou, alternativamente, estimada a partir de dimensões lineares das folhas, como comprimento e largura [4]. Diversos modelos teóricos de predição da área foliar baseiam-se exclusivamente em medidas do limbo foliar, utilizando modelos matemáticos lineares e não lineares, incluindo funções logarítmicas, exponenciais e de potência [1, 4]. No entanto, a precisão dessas equações depende da inclusão de uma ampla variação de tamanhos foliares na amostragem, bem como das características morfológicas do limbo, de modo a representar adequadamente o padrão de expansão alométrica da espécie [5]. Nesse sentido, a modelagem para a obtenção de equações alométricas constitui uma alternativa eficiente e não destrutiva para a estimativa da área foliar [4], permitindo avaliar o crescimento das espécies ao longo do tempo e do espaço sem a remoção excessiva de folhas [6], o que poderia comprometer o equilíbrio de recursos e a sobrevivência das plantas [7]. Além disso, esses modelos apresentam boa precisão e possibilitam estimativas rápidas e práticas da área foliar, mesmo em condições de campo com recursos tecnológicos limitados [8].

A AF é uma variável ambiental fortemente influenciada pelo clima e amplamente utilizada como indicador da variabilidade ambiental nas florestas tropicais secas, por refletir mudanças nas condições ambientais ao longo do tempo e do espaço [9]. Além do desenvolvimento de modelos alométricos específicos por espécie, a AF é base para caracterizar a estrutura e a composição da cobertura vegetal, por refletirem a estrutura do dossel e a distribuição da folhagem. Variações nesses índices, entre sítios ou ao longo do tempo, indicam diferenças na organização da comunidade vegetal [10-13]. No entanto, independentemente da adoção de metodologias diretas ou indiretas, a maioria desses estudos concentra-se nos componentes lenhosos da vegetação (arbóreos e arbustivos), enquanto as espécies herbáceas do sub-bosque, apesar de sua elevada representatividade nestas florestas secas, permanecem sub-representadas na literatura [14].

Partindo desses pressupostos, o objetivo deste trabalho é construir modelos de estimativas da área foliar para espécies-chave da flora herbácea piauiense, com base nas dimensões lineares do limbo foliar destas espécies. Essas equações são úteis para a medição precisa da área foliar em experimentos manipulados em laboratório e campo, gerando economia de tempo e recursos financeiros. Além disso, essas equações são específicas por espécie, pois se fundamentam em traços morfológicos característicos, o que permite sua aplicação em diferentes contextos ambientais, desde que tais traços sejam mantidos [11]. Portanto, com este trabalho pretendemos responder à seguinte questão: Equações alométricas ajustadas às dimensões da folha de herbáceas podem prever a área foliar das espécies-chave com precisão e confiabilidade?

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área do estudo

No estado do Piauí, a vegetação natural é dominada por dois biomas principais: o Cerrado e a Caatinga. Segundo mapeamentos oficiais, o Cerrado ocupa a maior porção do território, com cerca de 52,8% da área estadual, enquanto a Caatinga abrange aproximadamente 47,2%, caracterizando o Piauí como uma região de transição ecológica entre esses biomas [15]. Em 2024, o Piauí apresentou cerca de 78,7% do território coberto por formações florestais (~198 mil km²), além de 1,4% de vegetação herbácea e arbustiva, com heterogeneidade espacial associada à expansão da agropecuária (18,7%), que contribui para a fragmentação de habitats [16]. Cerca de 31,1% do território é destinado à vegetação nativa, incluindo áreas de preservação permanente (APPs), reserva legal (RL), vegetação excedente e áreas associadas à hidrografia. Quando somadas às Unidades de Conservação, as áreas protegidas totalizam 36,4% do território estadual [17].

A seleção da área amostrada (Figura 1) teve como critério principal a ocorrência de populações das espécies herbáceas avaliadas neste estudo, além de critérios específicos relacionados ao histórico de preservação e ao baixo grau de perturbação crônica de origem antrópica. A área de estudo está localizada na capital do estado do Piauí (Teresina), inserida em uma zona de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado, com vegetação classificada como floresta estacional semidecidual, e apresenta temperatura média anual entre 27 °C e 31 °C, com precipitação média anual de 1.313,43 mm. O clima da região é classificado como megatérmico úmido com inverno seco, apresentando precipitação inferior a 60 mm no mês mais seco e temperatura média de 18 °C no mês mais frio, de acordo com a classificação de Köppen, correspondente ao tipo Aw [18]. O fragmento para as coletas das folhas possui área total de 82.069 m² e está localizado no Centro de Ciências da Natureza II (CCNII), no Campus Ministro Petrônio Portella da Universidade Federal do Piauí, em Teresina (PI) (Figura 1). Considerando que as espécies herbáceas formam populações preferencialmente em áreas de borda, clareiras e ambientes naturalmente abertos no interior da mata, as coletas foram realizadas principalmente ao longo do perímetro da área amostrada, que apresenta extensão aproximada de 1.262 m (Figura 1).

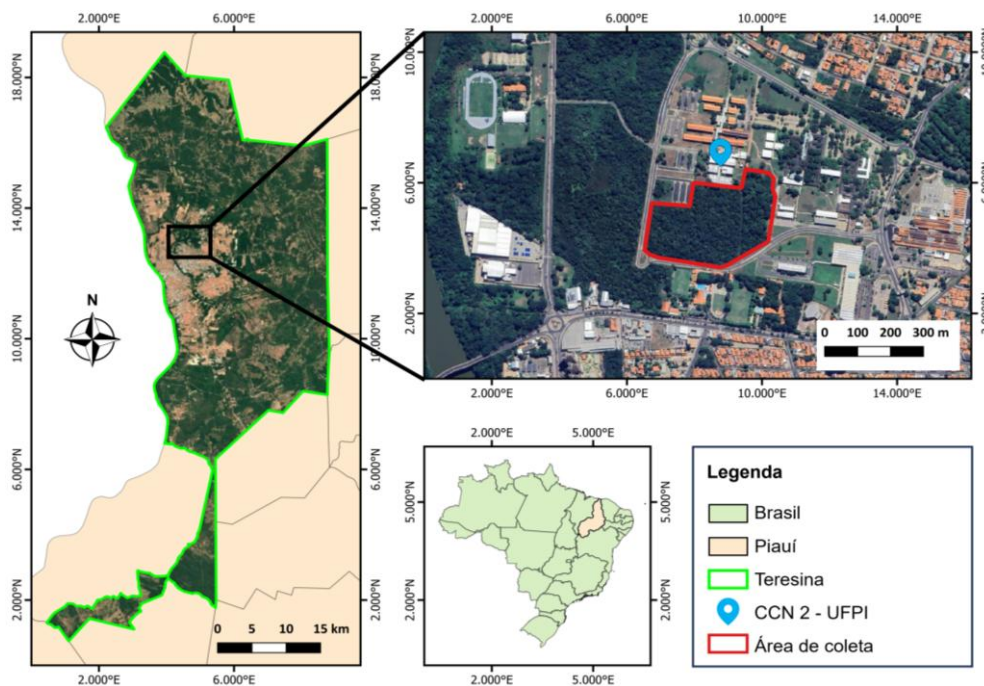


Figura 1: Mapa da área de estudo localizado no Centro de Ciências da Natureza II (CCNII), no Campus Ministro Petrônio Portella da Universidade Federal do Piauí, em Teresina (PI) (GMS: 5°03'33,9" S; 42°47'59,5" W; GD: -5,059417; -42,799861).

2.2 Espécies estudadas

Foram selecionadas quatro espécies-chave da flora (*Turnera subulata* Sm.; *Waltheria indica* L.; *Macroptilium lathyroides* (L.) Urb.; *Galinsoga parviflora* Cav.) seguindo os critérios: maior abundância, distribuição e dominância; funções ecossistêmicas; ameaças à conservação; e importância cultural. Estas quatro espécies herbáceas são facilmente encontradas na área do estudo (Tabela 1).

A espécie *Turnera subulata* Sm. (Figura 2a) é uma herbácea perene nativa da região tropical das américas que pode medir de 20 cm a 1,5 m de altura. Possui folhas simples, ovais, obovais ou lanceoladas de margens serreadas, consistência membranácea e filotaxia alterna, apresentando nectário extrafloral próximo à base do limbo, podendo ou não possuir estípulas [19]. Suas flores são pentâmeras com corola variando do marrom ao roxo na base e do amarelo ao creme nas extremidades. Estas se abrem apenas pela manhã e se fecham ao entardecer, rendendo a ela o nome popular de “flor-do-bom-dia” em algumas regiões. A *T. Subulata* é amplamente cultivada como planta ornamental e medicinal, além de ser considerada uma PANC [20, 21].

A *Waltheria indica* L. (Figura 2b) é uma planta herbácea, arbustiva ou subarbustiva presente em praticamente todo o continente americano, sobretudo nas regiões onde o clima tropical é mais presente podendo alcançar em média 1,20 m de altura, com folhas simples ovais a lanceoladas, de margens serreadas e consistência cartácea, com estípulas. Inflorescências em cimeiras ou corimbos que brotam da axila das folhas e no ápice do caule e abrigam pequenas flores de pétalas amarelas ou brancas. *W. Indica* possui importância medicinal, pois suas folhas são utilizadas no preparo de chás para consumo e tratamento de disenteria, como diurético, emético, cicatrizante e estimulante [22, 23].

A *Macroptilium lathyroides* (L.) Urb (Figura 3c) é uma herbácea ereta ou trepadeira presente em toda a porção tropical das américas, alcançando até 1.5 m de altura. Possui folhas trifolioladas de folíolos oblongos a lanceolados, ocasionalmente apresentando lobos laterais próximos à base, margem lisa e consistência membranácea, com estípulas. Inflorescências racemosas com flores de corola papilionácea roxa a rósea, pentâmera. A *M. Lathyroides* (L.) Urb é amplamente utilizada na alimentação animal e ornamentação [24]

A *Galinsoga parviflora* Cav. (Figura 2d) é uma erva rasteira perene ou anual de até 50 cm de altura, possui folhas ovais a lanceoladas, margens serreadas e base cuneada ou atenuada, ocasionalmente formando projeções pontudas. Abrigam pequenas inflorescências em capítulos terminais cujas flores do raio possuem corolas brancas e as do disco corolas amarelas. A *G. parviflora* Cav. é utilizada como planta medicinal, possuindo propriedades anti-inflamatórias e cicatrizantes e sendo empregada no tratamento de feridas, lesões, cicatrizes, gripes e resfriados [21].

Tabela 1: Relação das espécies chaves herbáceas de florestas tropicais secas utilizadas no estudo de estimativa da área foliar.

Nome popular	Características das plantas estudadas			
	Espécie	Família	Distribuição geográfica	Tipo de folha
Chanana	<i>Turnera subulata</i> Sm.	Turneraceae	Todas as regiões do Brasil	Simple, oval a lanceolada
Malva-branca	<i>Waltheria indica</i> L.	Malvaceae	Todas as regiões do Brasil	Simple, oval a lanceolada
Feijão-roxo	<i>Macroptilium lathyroides</i> (L.) Urb	Fabaceae	Todas as regiões do Brasil	Composta trifoliolada, folíolos oblongos
Picão-branco	<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.	Asteraceae	Todas as regiões do Brasil	Simple, dois morfotipos

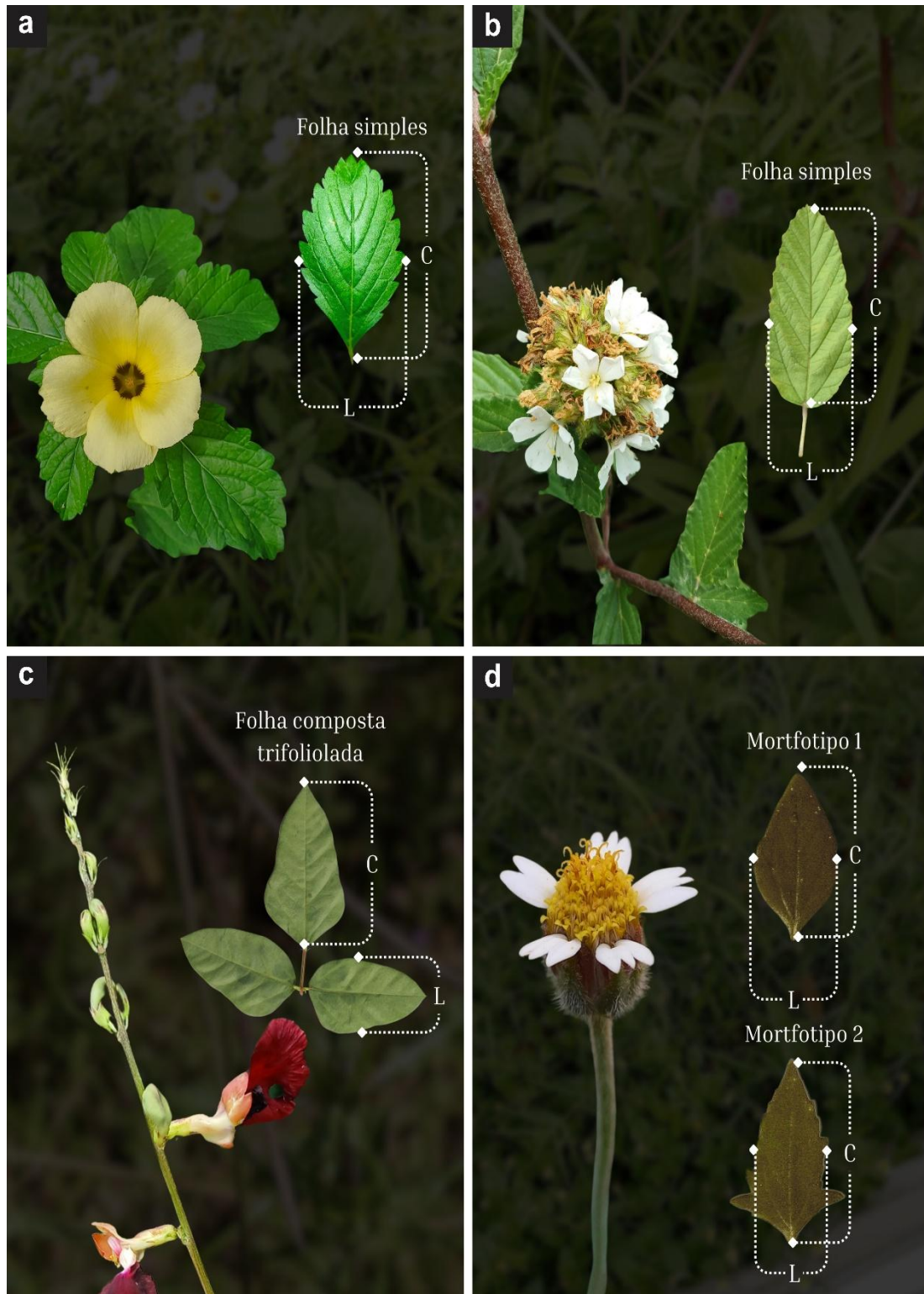


Figura 2: Espécies modelo e seus respectivos morfotipos foliares de herbáceas selecionadas para a construção de modelos matemáticos de estimativa da área foliar: (a) *Turnera subulata* Sm. (chanana, flor-do-bom-dia), família Turneraceae; (b) *Waltheria indica* L. (erva-cidreira, malva-branca), família Malvaceae; (c) *Macroptilium lathyroides* (L.) Urb. (feijão-roxo), família Fabaceae; (d) *Galinsoga parviflora* Cav. (picão-branco), família Asteraceae, com indicação de dois morfotipos foliares. C = comprimento do limbo; L = largura do limbo.

2.3 Estimativa da área foliar

As coletas foram realizadas durante os meses de fevereiro e março, correspondendo ao meio e final da estação chuvosa na região, período que as espécies chegaram ao ápice do seu crescimento vegetativo e estão iniciando o processo reprodutivo. Para a obtenção das equações de estimativa de área foliar, foram selecionadas 30 folhas de indivíduos diferentes para cada espécie, sendo coletada uma folha por indivíduo. A amostragem buscou abranger uma ampla variação de tamanhos e formatos do limbo foliar, dando-se preferência a folhas visivelmente saudáveis, completamente expandidas e localizadas na região média do caule. A coleta de diferentes indivíduos das espécies nos possibilitou obter uma ampla variação biométrica foliar, considerando a diversidade genética existente nas populações [4]. Como a espécie *Picão-branco* (*Galinsoga parviflora* Cav.) apresentava dois morfotipos foliares (Figura 2d), foram selecionadas 15 folhas para cada variação, totalizando duas folhas por indivíduo, uma para cada morfotipo. As folhas foram escaneadas e medidas quanto ao comprimento (C, cm), largura (L, cm) e área (AF, cm²), com o auxílio do *software* Image J [25]. O comprimento máximo (C) foi definido como a maior distância entre o ponto de inserção do pecíolo no limbo e o ápice da folha, enquanto a largura máxima (L) corresponde à maior dimensão perpendicular ao comprimento. Os resultados foram tabulados em planilha eletrônica e processados estatisticamente por meio do *software* Statistica, versão 7.0 (StatSoft Inc., Tulsa, EUA).

2.4 Parâmetros estatísticos

Em todas as espécies, independentemente do morfotipo foliar, a AF foi considerada como variável dependente no modelo, e a multiplicação das dimensões lineares “L*C” como variáveis independentes (variáveis explicativas). Submetemos as medidas à análise de regressão linear para obtenção dos modelos lineares [5]. As equações serão selecionadas, e sua confiabilidade, observando os seguintes critérios estatísticos: (i) o valor de F e a significância da análise ($p < 0,05$), (ii) coeficiente de determinação ajustado (R^2), (iii) erro padrão estimado (S_{yx}), (iv) distribuição gráfica dos resíduos e (v) reestimação dos modelos (O teste de identidade) [26]. A hipótese de normalidade do resíduo foi avaliada, tendo como premissa que a heterocedasticidade em cada modelo, quando detectado é motivo de desqualificação do modelo. As equações foram selecionadas com base nos princípios de simplicidade e praticidade, sendo ajustadas por meio de modelos lineares simples ($Y = \beta_0 + \beta_1(C*L) + e_i$; $Y = \text{Área Foliar}$; $C = \text{comprimento máximo}$; $L = \text{largura máxima}$; $CL = \text{produto de } C*L$; β_0 e $\beta_1 = \text{parâmetros dos modelos}$ e $e_i = \text{erro aleatório}$) [26].

3. RESULTADOS

3.1 Características Foliares das Espécies

A espécie *Turnera subulata* apresentou uma variação em sua área foliar de $16,37 \text{ cm}^2 \pm 6,21 \text{ cm}^2$, com amplitude de 4,85 a $30,67 \text{ cm}^2$, além de variações no comprimento e largura médios das folhas de $5,70 \pm 1,02 \text{ cm}$ e $3,34 \pm 0,80 \text{ cm}$ respectivamente (Tabela 2). *Waltheria indica* apresentou variação de $5,14 \text{ cm}^2 \pm 2,71 \text{ cm}^2$, com amplitude de $1,96 \text{ cm}^2$ a $13,51 \text{ cm}^2$ e valores de comprimento e largura variando entre $3,62 \pm 0,78 \text{ cm}$ e $1,71 \pm 0,49 \text{ cm}$ respectivamente. *Macroptilium lathyroides* apresentou variação de AF de $10,77 \text{ cm}^2 \pm 3,59 \text{ cm}^2$, com amplitude de 3,90 a $17,71 \text{ cm}^2$, além das variações de comprimento e largura das folhas de $4,98 \pm 0,82 \text{ cm}$ e $2,69 \pm 0,61 \text{ cm}$ respectivamente (Tabela 2). Para *Galinsoga parviflora*, como já supracitado, foram encontrados dois morfotipos foliares diferentes. O morfotipo 1 apresentou variação na AF de $4,98 \pm 1,5 \text{ cm}^2$, com amplitude de 2,98 a $7,99 \text{ cm}^2$, e variações no comprimento e largura de $3,38 \pm 0,44 \text{ cm}$ e $1,85 \pm 0,36 \text{ cm}$ respectivamente. O morfotipo 2 apresentou variação de AF de $4,59 \pm 1,90 \text{ cm}^2$ com amplitude de 1,62 a $9,38 \text{ cm}^2$ e variação em seus valores de comprimento e largura de $3,30 \pm 0,47 \text{ cm}$ e $1,72 \pm 0,50 \text{ cm}$ (Tabela 2), denotando que apesar de sua plasticidade fenotípica, os atributos foliares da AF se mantém em valores próximos.

Tabela 2: Valores máximos e mínimos do comprimento, largura e área foliar real, obtidos a partir de folhas das espécies herbáceas de florestas tropicais secas, seguido das respectivas médias, desvio padrão, valores mínimos e máximos das variáveis e do tipo do limbo foliar.

Espécie	Atributos	Nº folhas	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
<i>Turnera subulata</i> Sm.	Área (cm ²)	30	16,37	4,85	30,67	6,21
	Comprimento (cm)	30	5,70	3,23	7,85	1,02
	Largura (cm)	30	3,54	1,91	4,97	0,80
<i>Waltheria indica</i> L.	Área (cm ²)	30	5,14	1,97	13,51	2,71
	Comprimento (cm)	30	3,62	2,37	5,56	0,78
	Largura (cm)	30	1,71	1,06	3,08	0,49
<i>Macroptilim lathyroides</i> (L.) Urb	Área (cm ²)	30	10,77	3,90	17,71	3,59
	Comprimento (cm)	30	4,98	3,52	6,72	0,82
	Largura (cm)	30	2,69	1,41	3,75	0,61
<i>Galinsoga parviflora</i> Cav. (Morfotipo 1)	Área (cm ²)	15	4,98	2,78	7,99	1,50
	Comprimento (cm)	15	3,38	2,64	4,07	0,44
	Largura (cm)	15	1,85	1,24	2,51	0,36
<i>Galinsoga parviflora</i> Cav. (Morfotipo 2)	Área (cm ²)	15	4,59	1,62	9,38	1,90
	Comprimento (cm)	15	3,30	2,39	4,10	0,47
	Largura (cm)	15	1,72	0,86	2,91	0,50

3.2 Equações Alométricas

O modelo ajustado para estimar a área foliar de *Turnera subulata* Sm. demonstrou forte correlação entre as medidas lineares do limbo foliar e a AF observada. A equação “ $AF = -0,000099 + 0,78540 * C*L$ ”, demonstrou altos valores para o R^2_{aj} (1,0), a qual se ajusta perfeitamente aos dados e valida a utilização deste modelo para estimativa da AF (Tabela 3; Figura 3). As associações (modelos de validação) dos valores reais de AF e os correspondentes valores de AF estimada, verifica-se uma associação linear ($p < 0,01$), indicando bons ajustes do modelo matemático para estimar a área foliar desta espécie, o qual reforça a seguridade e a confiabilidade dos parâmetros. Para *Waltheria indica* L. o modelo também apresentou forte correlação entre as medidas lineares do limbo e a AF observada nas folhas, tendo a equação “ $AF = 0,00009106 + 0,78539 * C*L$ ” demonstrado altos valores de R^2_{aj} (1,0) (Tabela 3; Figura 3). Assim como para *T. subulata*, as associações dos valores reais da AF e dos valores de AF estimada expressaram forte associação linear com valores de $p < 0,01$, revelando a segurança e fidedignidade do modelo (Tabela 3; Figura 3).

Tabela 3: Modelos, coeficientes de regressão (β_0, β_1), erros padrão das estimativas (S_{xy}), coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}), graus de liberdade dos resíduos (G_{res}), quadrado médio do resíduo (Q_{res}) e equação estimadora da área foliar (\hat{Y}) em função das medidas lineares das folhas das herbáceas de florestas secas.

Espécies	Coeficientes		$S_{(xy)}$	R^2_{aj}	G_{res}	Q_{res}	p	Estimador = (\hat{y})
	β_0	β_1						
<i>T. subulata</i> Sm.	-0,000099	0,785403	0,0019	1,00	28	3,55E-08	0,00	$\hat{Y} = -0,000099 + 0,78540 * C*L$
<i>W. indica</i> L.	9,1066E-05	0,785387	0,00009	1,00	28	8,55E-09	0,00	$\hat{Y} = 0,00009106 + 0,78539 * C*L$
<i>M. lathyroides</i> (L.) Urb	1,1356E-05	0,785396	0,00014	1,00	28	2,16E-08	0,00	$\hat{Y} = 0,00001135 + 0,78540 * C*L$
<i>G. parviflora</i> Cav. (Morfotipo 1)	0,00054555	0,785293	0,0009	1,00	13	9,29E-07	0,00	$\hat{Y} = 0,0005455 + 0,78529 * C*L$
<i>G. parviflora</i> Cav. (Morfotipo 2)	-8,768E-05	0,785376	0,0006	1,00	13	4,58E-07	0,00	$\hat{Y} = -0,000087 + 0,0000746 * C*L$

A equação “ $AF = 0,00001135 + 0,78540 * C*L$ ” para a *Macroptilium lathyroides* (L.) Urb. igualmente apresentou valores de R^2_{aj} (1,0) que suportam os dados e atestam sua validade como estimador de AF, reforçada pelas associações dos valores reais e estimados retornarem uma associação linear com $p < 0,01$ (Tabela 3; Figura 3). Adicionalmente, seu modelo alométrico deve ser aplicado para as medidas dos folíolos, uma vez que apresenta limbo composto, para evidenciar a real AF. Para *Galinsoga parviflora* Cav. foram obtidas duas equações: “ $AF = 0,0005455 + 0,78529 * C*L$ ” para o morfotipo 1 e “ $AF = -0,000087 + 0,0000746 * C*L$ ” para o morfotipo 2. Para ambos os morfotipos, foram observados valores de R^2_{aj} equivalentes aos das demais espécies (1,0 e 1,0). As associações entre a AF real e AF de ambos morfotipos estimada revelaram correlação linear com valores $p < 0,01$ que atestam sua confiabilidade (Tabela 3; Figura 3).

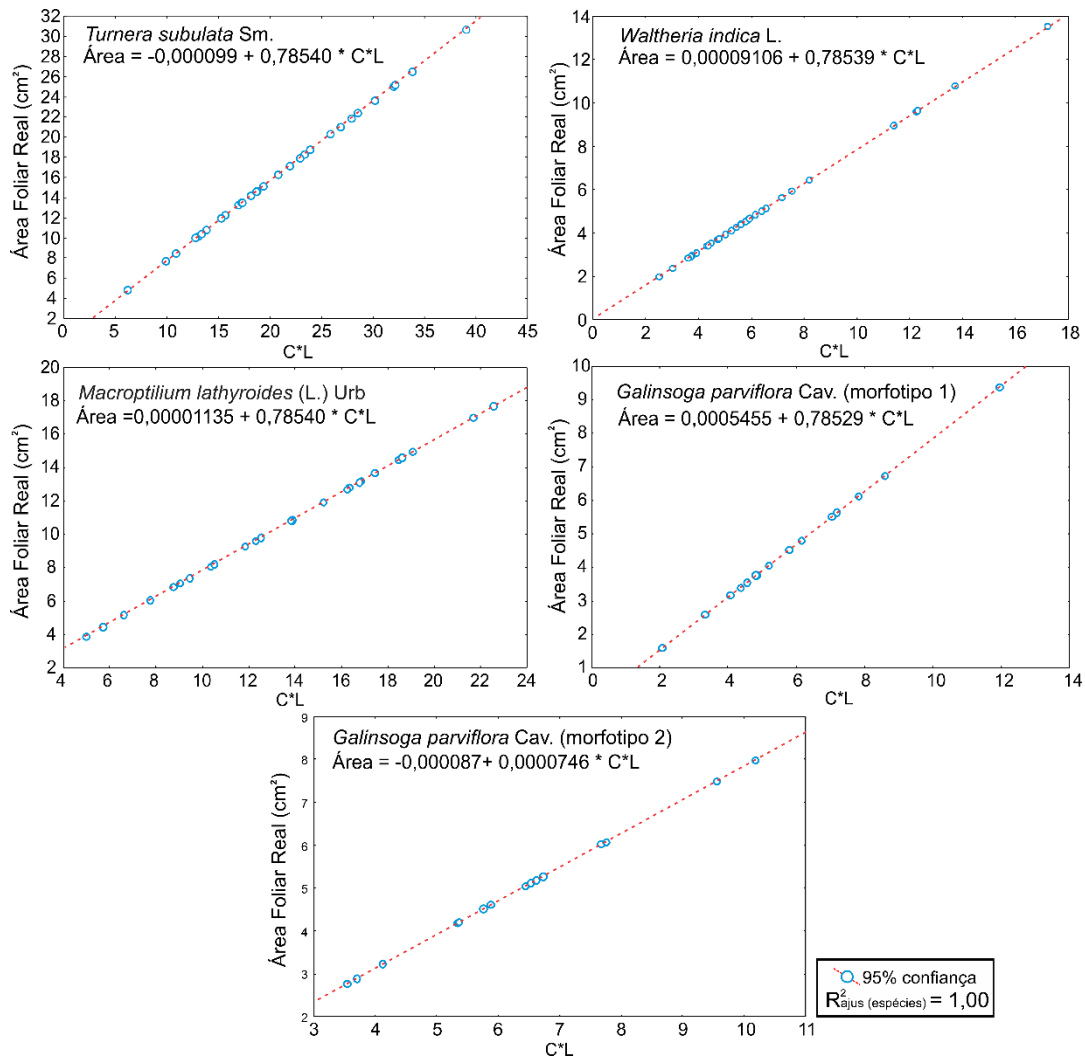


Figura 3: Diagrama de dispersão entre AF e as dimensões lineares ($C \times L$) das folhas das espécies herbáceas de florestas secas, usando modelos lineares.

4. DISCUSSÃO

A área foliar (AF) é um parâmetro morfofisiológico fundamental para o crescimento vegetal, estando diretamente associada à capacidade fotossintética das plantas, uma vez que influencia a interceptação da luz pelo limbo foliar [1, 27]. Variações nas dimensões do limbo refletem ajustes na eficiência de captação luminosa e no uso de recursos hídricos [26, 28, 29], especialmente em espécies herbáceas, como as avaliadas neste estudo, que se desenvolvem sob o dossel ou em ambientes heterogêneos, como lacunas e bordas de mata, caracterizados por elevada variabilidade luminosa [29]. Nesses contextos, a AF constitui uma característica funcional chave para a

ocorrência local e a persistência das espécies em ambientes com alta e baixa disponibilidade luminosa [30].

Neste estudo, a área foliar (AF) foi estimada com alta precisão por meio de modelos lineares simples, os quais apresentaram boa acurácia, confirmando a viabilidade dessa abordagem para aplicações em estudos ecofisiológicos e em programas de monitoramento ambiental [6, 7]. No entanto, a literatura demonstra que diferentes abordagens matemáticas, incluindo modelos lineares e não lineares, como funções logarítmicas, exponenciais e de potência, têm sido amplamente testadas quanto à sua eficácia [1, 4, 5, 8]. De modo geral, esses modelos são formulados a partir de variáveis morfométricas simples do limbo foliar, sendo a variável explicativa, o produto entre o comprimento e a largura da folha [31-34]. Essa abordagem baseia-se na forte relação alométrica entre as dimensões lineares das folhas e sua área total, permitindo estimativas consistentes mesmo diante de variações morfológicas intraespecíficas [4].

A variabilidade observada na morfometria foliar das espécies herbáceas avaliadas, amplamente distribuídas em florestas tropicais secas, sugere a ocorrência de plasticidade fenotípica em resposta a variações nas condições micro e macroambientais, associadas a diferentes contextos de ocorrência ou coleta, como áreas urbanas ou naturais, bordas ou interior da mata, abertas ou sombreadas, [2, 28, 29, 35]. Embora tenham sido registradas variações nos valores de área foliar das espécies *Turnera subulata*, *Waltheria indica*, *Macroptilium lathyroides* e *Galinsoga parviflora*, tais variações não comprometeram o desempenho dos modelos matemáticos propostos. Pelo contrário, os resultados evidenciaram forte correlação entre as medidas lineares do limbo foliar e a AF estimada, indicando que os padrões morfológicos fundamentais das folhas foram mantidos entre os indivíduos amostrados. Essa estabilidade estrutural sustenta a aplicabilidade dos modelos de estimativa da AF sob diferentes condições ambientais [11]. Contudo, considerando que muitas espécies podem expressar estratégias morfológicas distintas em resposta ao ambiente, com investimento diferencial ou supressão de determinadas características foliares [26, 29], ressalta-se a importância de uma criteriosa comparação com as morfologias avaliadas neste estudo, a fim de evitar vieses e assegurar a aplicação adequada dos modelos matemáticos propostos nos diferentes ambientes.

Especificamente, *G. parviflora* apresentou uma descontinuidade no padrão morfométrico foliar, o que levou à identificação de dois morfotipos foliares distintos. Esse padrão parece ser característico do gênero, no qual a ocorrência de até três morfotipos foliares já foram descritas [36]. No entanto, a observação de apenas dois morfotipos foliares neste estudo reforça a ideia de que a produção e a expressão desses morfotipos podem variar em resposta às condições ambientais e/ou a fatores genéticos [37]. Essas constatações devem ser consideradas na construção e na aplicabilidade dos modelos matemáticos de estimativa da área foliar desta espécie, uma vez que a arquitetura foliar está diretamente relacionada a fatores bióticos e abióticos. Por exemplo, *Capsella bursa-pastoris*, uma planta anual cosmopolita, apresenta variação na forma das folhas fortemente associada à temperatura durante a estação de crescimento, com redução da lobulação à medida que a temperatura aumenta, mantendo, contudo, um nível de variação consistente ao longo de aproximadamente 100 anos [38].

Ressalta-se que a adoção dos modelos não destrutivos propostos neste estudo é estratégica, pois possibilita a avaliação de parâmetros fisiológicos de forma prática e acessível, sem a necessidade de remoção de folhas para análise, a qual poderia comprometer os processos de fixação de carbono das espécies herbáceas e interferir na avaliação de outros atributos em estudos de campo ou em ambientes controlados [5, 9, 10, 39]. Em contraste, a mensuração destrutiva gera interferências no crescimento e na produtividade vegetal, uma vez que a remoção parcial ou total de folhas reduz a área fotossinteticamente ativa, altera o balanço de carbono e pode desencadear respostas compensatórias, com potenciais prejuízos à sobrevivência dos indivíduos [26, 39].

Em estudos com herbáceas de florestas secas, a abordagem não destrutiva torna-se ainda mais relevante, pois essas plantas prolongam a vida útil de suas folhas e mantêm, com frequência, menor produção foliar, especialmente em anos atípicos de baixa precipitação dentro da estação chuvosa, adotando estratégias que preservam a estrutura foliar funcional para a fotossíntese, sem incorrer nos elevados custos energéticos associados à produção de nova folhagem [26]. Além disso, considerando que essas espécies apresentam porte reduzido, crescimento restrito ao período chuvoso e ciclo reprodutivo curto (anuais) ou concentrado nessa estação (perenes), qualquer

remoção foliar pode representar uma ameaça à conclusão do ciclo reprodutivo e, conseqüentemente, à sobrevivência dos indivíduos [40].

Outro ponto crítico é que, frequentemente, os estudos sobre modelos alométricos para estimativa da área foliar (AF) florestal priorizam os componentes lenhosos [4], atribuindo às comunidades herbáceas menor atenção. Quando realizadas, as pesquisas focadas nesse grupo funcional geralmente se concentram em espécies ornamentais [41, 27] ou de interesse forrageiro [34], muitas das quais não pertencem aos ecossistemas secos analisados. No entanto, as espécies herbáceas podem dominar a paisagem desses ecossistemas secos e representam uma parcela significativa da riqueza dos bancos de sementes no solo [40]. Elas desempenham um papel na manutenção do grau de umidade do ambiente, criando condições favoráveis para os processos de sucessão secundária, especialmente para o estabelecimento posterior de espécies arbustivas e arbóreas [42]. Essa lacuna no conhecimento sobre a dinâmica funcional das herbáceas na Caatinga reforça a relevância dos dados apresentados neste estudo.

5. CONCLUSÃO

Este estudo apresentou equações lineares inéditas para a estimativa da área foliar de espécies herbáceas-chave nativas de florestas secas, suprimindo uma lacuna existente na literatura para as espécies analisadas. As equações geradas, baseadas no produto das dimensões do limbo foliar ($C \times L$) como variável explicativa, apresentaram elevada acurácia e foram devidamente validadas, demonstrando potencial para aplicação segura em estudos ecofisiológicos, biológicos e agrônômicos. A metodologia proposta constitui uma alternativa prática, eficiente e de baixo custo, dispensando a amostragem destrutiva e o uso de dispositivos eletrônicos complexos. Além disso, os resultados reforçam a importância da inclusão das espécies herbáceas em modelos alométricos, considerando seu papel fundamental na dinâmica sucessional e no funcionamento dos ecossistemas secos.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal do Piauí (UFPI) e ao Laboratório de Ecofisiologia e Biologia da Conservação (LEBCon) pelo apoio logístico e pela infraestrutura que possibilitaram a execução deste estudo. Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; bolsa de estudos nº 167901/2022-2) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI; Termo de Concessão nº 21/2023) pelo apoio financeiro, concessão de bolsas de estudo e financiamento de projetos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bréda NJJ. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *J Exp Bot.* 2003;54(392):2403-17. doi: 10.1093/jxb/erg263
2. Passos WRS, Nascimento RPO, Sousa LR, Aguiar BAS, Medeiros MJL, Lopes CGR. Estratégias de uma herbácea de florestas secas da sombra ao sol: é melhor investir em fixar carbono ou reservar água? *Rev Trópica Ciênc Agr Biol.* 2023;15(1):42-7.
3. Reich PB. The world-wide ‘fast–slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto. *J Ecol.* 2014;102(2):275-301. doi: 10.1111/1365-2745.12211
4. Pompelli MF, Antunes WC, Ferreira DT, Cavalcante PG, Wanderley-Filho HCL, Endres L. Allometric models for non-destructive leaf area estimation of *Jatropha curcas*. *Biomass Bioenergy.* 2012;36:77-85. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.10.010
5. Keramatlou I, Sharifani M, Sabouri H, Alizadeh M, Kamkar B. A simple linear model for leaf area estimation in Persian walnut (*Juglans regia* L.). *Sci Hortic.* 2015;184:36-9. doi: 10.1016/j.scienta.2014.12.017
6. Lopes CM, Andrade I, Pedrosa V, Martins S. Modelos empíricos para estimativa da área foliar da videira na casta Jaen. *Ciênc Téc Vitiv.* 2004;19(2):61-75.
7. Poorter H, Lambers H, Evans JR. Trait correlation networks: a whole-plant perspective on the recently criticized leaf economic spectrum. *New Phytol.* 2014;201(2):378-82. doi: 10.1111/nph.12547

8. Antunes WC, Pompelli MF, Carretero DM, DaMatta FM. Allometric models for non-destructive leaf area estimation in coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*). *Ann Appl Biol.* 2008;153(1):33-40. doi: 10.1111/j.1744-7348.2008.00235.x
9. Galvncio JD, Mendes SM, Morais YCB, Miranda RQ, Souza WM, Moura MSB, et al. Correlação linear entre a precipitação e o ndice de área foliar do bioma Caatinga. *Rev Bras Geogr Fs.* 2020;13(07):3304-14. doi: 10.26848/rbgf.v13.07.p3304-3314.
10. Silva CVS, Silva JLB, Moura GBAA, Lopes PMO, Nascimento CR, Silva LC. Monitoramento da cobertura vegetal por sensoriamento remoto no semiárido brasileiro através de índices de vegetação. *Nativa.* 2019;7(6):708-17. doi: 10.31413/nativa.v7i6.7646
11. Miranda RQ, Nóbrega RLB, Moura MSB, Raghavan S, Galvncio JD. Realistic and simplified models of plant and leaf area indices for a seasonally dry tropical forest. *Int J Appl Earth Obs Geoinf.* 2020;85:101992. doi: 10.1016/j.jag.2019.101992
12. Melo CGB, Fernandes GST, Lopes PMO, Oliveira VB, Pessoa VG. Variación espacio-temporal de los índices de vegetación y evapotranspiracin en áreas de caatinga. *Rev Geocienc Nordeste.* 2021;7(2):253-9. doi: 10.21680/2447-3359.2021v7n2ID24343
13. Santos CVB. Avaliação do ndice de área foliar e ndice de área da planta em floresta seca utilizando modelos simplificados em imagens de alta resolução com o uso de VANT. *J Hiperespectr Remote Sens.* 2022;12(3):109-23. doi: 10.29150/2237-2202.2022.254276
14. Munhoz CBR, Araújo GM. Métodos de amostragem do estrato herbáceo-subarbusivo. In: Felfili JM, Eisenlohr PV, Melo MMRF, Andrade LA, Meira Neto JA, organizadores. *Fitossociologia no Brasil: Métodos e estudos de caso.* vol. 1. Viçosa (MG): Editora UFV; 2011. p. 213-30.
15. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250 000.* Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais; 2019. (Relatórios metodológicos, vol. 45).
16. MAPBIOMAS [Internet]. Piaui: Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra; 2024 [acesso em 05 abr 2026]. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>.
17. Castelões L. Mais de 60% da área dos imóveis rurais do Piaui são destinados à preservação ambiental. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) [Internet]; 16 set 2019 [citado em 4 mai 2023]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/46570274/mais-de-60-da-area-dos-imoveis-rurais-do-piaui-sao-destinados-a-preservacao-ambiental>.
18. Menezes HEA, Medeiros RM, Santos JLG. Climatologia da pluviometria do município de Teresina, Piaui, Brasil. *Rev Verde Agroecol Desenv Sustent.* 2016;11(4):135-41. doi: 10.18378/rvads.v11i4.4609
19. Rocha L, Nogueira JWA, Figueiredo MF, Loiola MIB. Flora do Ceará: Turneraceae. *Rodriguésia.* 2018;69(4):1673-700. doi: 10.1590/2175-7860201869414
20. Kinupp VF, Lorenzi H. *Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC) no Brasil.* Reimpressão. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora; 2017.
21. Lorenzi H. *Plantas para jardim no Brasil – herbáceas, arbustivas e trepadeiras.* 2. ed. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora; 2015.
22. Colli-Silva M, Esteves GL, Duarte MC. Flora da Serra do Cipó, Minas Gerais: Byttnerioideae, Belicerioideae e Sterculioideae (Malvaceae). *Bol Bot Univ São Paulo.* 2019;37:27-48. doi: 10.11606/issn.2316-9052.v37ip27-48
23. Nirmala C, Sridevi M. Ethnobotanical, phytochemistry, and pharmacological property of *Waltheria Indica* Linn. *Future J. Pharm. Sci.* 2021;7:14. doi: 10.1186/s43094-020-00174-3
24. Reis LK, Fonseca DRD, Roghanian S, Barros BCD, Sigrist MR. Reproductive strategies of the *Macroptilium lathyroides* (Papilionoideae: Phaseoleae) explain the success of ruderal species in anthropized environments. *Rodrigusia.* 2021;72:e01782020. doi: 10.1590/2175-7860202172135
25. Abrmoff MD, Magalhães PJ, Ram SJ. Image processing with ImageJ. *Biophotonics Int.* 2004;11:36-42.
26. Aguiar BAS, Souza JD, Simões JA, Prazeres FPS, Andrade JR, Silva KA, et al. Understanding vegetative ecophysiological responses of herbaceous species from a Brazilian dry forest by simulating 60-year precipitation extremes. *Plant Species Biol.* 2025;40(1):101-19. doi: 10.1111/1442-1984.12498
27. Teobaldelli M, Basile B, Giuffrida F, Romano D, Toscano S, Leonardi C, et al. Analysis of cultivar-specific variability in size-related leaf traits and modeling of single leaf area in three medicinal and aromatic plants: *Ocimum basilicum* L., *Mentha* spp., and *Salvia* spp. *Plants.* 2019;9(1):13. doi: 10.3390/plants9010013
28. Chen JM, Black TA. Foliage area and canopy architecture of plant canopies from sunfleck size distributions. *Agric For Meteorol.* 1992;60:249-66. doi: 10.1016/0168-1923(92)90040-B
29. Aguiar BAS, Soares ESS, Souza JD, Simões JA, Santos DM, Araujo VKR, et al. Vegetative and reproductive responses from full sunlight to shade of a pantropical herbaceous plant in Caatinga vegetation. *Forests.* 2026;17(2):153. doi: 10.3390/f17020153

30. Chelli S, Ottaviani G, Simonetti E, Campetella G, Wellstein C, Bartha S, et al. Intraspecific variability of specific leaf area fosters the persistence of understorey specialists across a light availability gradient. *Plant Biol.* 2021;23(1):212-6. doi: 10.1111/plb.13199
31. Nieto-Garibay A, Paz OC, Ruiz-Espinoza FH, Murillo-Amador B, García-Hernández JL, Troyo-Diéguez E, et al. Mediciones lineales en la hoja para la estimación no destructiva del área foliar en albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Rev Chapingo Ser Hortic.* 2007;13(1):29-34.
32. Kumar R, Sharma S. Allometric model for nondestructive leaf area estimation in clary sage (*Salvia sclarea* L.). *Photosynthetica.* 2010;48:313-6. doi: 10.1007/s11099-010-0039-y
33. Ribeiro AMA, Mundim DA, Mendonça DCM, dos Santos KTH, Santos JSH, de Souza Oliveira V, et al. Leaf area estimation of garden boldo from linear dimensions. *J Agric Sci.* 2019;11:461-69 doi: 10.5539/jas.v11n5p461
34. Fernandes PB, Barbosa RA, Morais MDG, Medeiros-Neto CD, Gurgel ALC, Costa CM, et al. Evaluation and reparametrization of mathematical models for prediction of the leaf area of *Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri. *Trop Grassl-Forrajcs Trop.* 2020;8(3):214-9. doi: 10.17138/tgft(8)214-219
35. Aguiar BAS, Lopes CGR, Sousa GM, Medeiros MJLE, Silva KA, Araújo EL. Effect of simulated extreme rainfall on the vegetative phenology of perennial and annual herbaceous plants from a Brazilian dry forest. *Plant Biol.* 2024;26(5):868-77. doi: 10.1002/plb.12936
36. Canne JM. Cytological and morphological observations in *Galinsoga* and related genera (Asteraceae). *Rhodora.* 1983;85(843):355-66.
37. Paula JMD, Pinto-Maglio CAF, Pinto LR. Morphological analysis and DNA methylation in *Conyza bonariensis* L. Cronquist (Asteraceae) phenotypes. *Bragantia.* 2017;76(4):480-91. doi: 10.1590/1678-4499.2016.379
38. Hightower AT, Chitwood DH, Josephs EB. Herbarium specimens reveal links between leaf shape of *Capsella bursa-pastoris* and climate. *Am J Bot.* 2024;111(11):e16435. doi: 10.1002/ajb2.16435
39. Pompelli MF, Santos JN, Santos MA. Estimating leaf area of *Jatropha nana* through non-destructive allometric models. *AIMS Environ Sci.* 2019;6(2):59-76. doi: 10.3934/environsci.2019.2.59
40. Souza JD, Aguiar BAS, Santos DM, Araujo VKR, Simões JÁ, Andrade JR, et al. Dynamics in the emergence of dormant and non-dormant herbaceous species from the soil seed bank from a Brazilian dry forest. *J Plant Ecol.* 2020;13(3):256-65. doi: 10.1093/jpe/rtz048
41. Ribeiro JES, Nóbrega JS, Figueiredo FRA, Ferreira JTA, Pereira WE, Bruno RLA, et al. Estimativa da área foliar de *Mesosphaerum suaveolens* a partir de relações alométricas. *Rodriguésia.* 2020;71:e02952018. doi: 10.1590/2175-7860202071115
42. Santos DMD, Silva KAD, Cunha SRD, Aguiar BAD, Santos PSD, Araujo VKRD, et al. Spatial-temporal dynamics of a germinable seed bank of a semi-arid vegetation in the Brazilian northeast. *Forests.* 2024;15(7):1108. doi: 10.3390/f15071108