



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

ANA CLAUDIA BEZERRA ZANELLA

PARTIÇÃO E MODELAGEM DA BIOMASSA DE *Cenostigma macrophyllum* Tul.
EM ÁREA DE TRANSIÇÃO DOS BIOMAS CERRADO/CAATINGA

Bom Jesus – PI

2024

ANA CLAUDIA BEZERRA ZANELLA

**PARTIÇÃO E MODELAGEM DA BIOMASSA DE *Cenostigma macrophyllum* Tul.
EM ÁREA DE TRANSIÇÃO DOS BIOMAS CERRADO/CAATINGA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Produção Vegetal, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho

Coorientadora: Profa. Dra. Andressa Ribeiro

Bom Jesus – PI

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas
Setor de Processamento Técnico

Z28p Zanella, Ana Cláudia Bezerra.

Participação e modelagem da biomassa de *Cenostigma
macrophyllum* Tul. em área de transição dos biomas cerrado caatinga /
Ana Cláudia Bezerra Zanella. -- 2024.
59 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí. Programa
de Pós-Graduação em Ciências agrárias, Bom Jesus, Piauí, 2024.

“Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho”.

“Coorientadora: Profa. Dra. Andressa Ribeiro”.

1. Ciências agrárias. 2. Manejo florestal. 3. Semiárido. I. Ferraz
Filho, Antônio Carlos. II. Ribeiro, Andressa. III. Título.

CDD 630

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

ANA CLAUDIA BEZERRA ZANELLA

**PARTIÇÃO E MODELAGEM DA BIOMASSA DE *Cenostigma macrophyllum* Tul.
EM ÁREA DE TRANSIÇÃO DOS BIOMAS CERRADO/CAATINGA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, do Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de concentração: Produção Vegetal.

Linha de Pesquisa: Propagação e Manejo Cultural de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho.

Coorientadora: Profa. Dra. Andressa Ribeiro.

Aprovada em: 20 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho (UFPI)
Orientador

Documento assinado digitalmente
 ANDRESSA RIBEIRO
Data: 14/11/2025 16:21:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Andressa Ribeiro (UFPI)
Coorientadora

Documento assinado digitalmente
 XIMENA MENDES DE OLIVEIRA
Data: 16/11/2025 11:53:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Ximena Mendes de Oliveira (UFRA)
Examinadora Externa ao Programa

Rafaella Mayrinck

16/11/2015

Profa. Dra. Rafaella Carvalho Mayrinck (UNB)
Examinadora Externa ao Programa

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho e Dra. Andressa Ribeiro pela oportunidade, pelo apoio e pela orientação para a dissertação.

À minha família, em especial a minha irmã Ana Paula Bezerra Zanella, pelo apoio, paciência e compreensão.

Aos amigos Adriano, José Lucas, Osmar Júnior, Nadilton Alves, Teles Reis, Milena Soares, Francisco Leandro, Glauber Rondinele, Emylle Cibelle e Beatriz Vianna, não somente pela amizade, como pelo apoio e incentivo.

Aos integrantes do Grupo de Estudos em Manejo Florestal (GEMF): Marcelo Borges, Pedro Vitor, Rony Ventura, Lina Maira, Aimeé Jordania, Daniel Albino, Mateus Nogueira, Gleice Avellar, Rick Borges, Sérgio Augusto, Kennedy Porfírio, Carlos Augusto, Jarder Lima, Jean Miranda, Karolayne Martins, Layne Vieira, Luiza Guimarães, Tande Santos, pela colaboração durante a realização do trabalho.

Aos professores e técnicos do *campus* Professora Cinobelina Elvas, em especial aos professores Rosalvo Maciel, Silvokleio, Marcelo Xisto, Julian, Séfora Gil e Rafael Miranda que disponibilizaram os laboratórios e equipamentos para análise de dados.

Aos Professores do PPGCA pelos conhecimentos transmitidos.

Ao sr. Gerhard Heinrich Spiller, proprietário da Fazenda Aracajú, que apoiou a coleta de dados usados neste estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo apoio financeiro para auxiliar o desenvolvimento do projeto de pesquisa.

À Universidade Federal do Piauí, pelo apoio dado durante o mestrado.

A todos estes, meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Estudos sobre a compartimentação da biomassa em árvores individuais visam contribuir para o entendimento do papel da biomassa no sequestro de carbono e na manutenção de serviços ecossistêmicos. *Cenostigma macrophyllum* Tul. conhecida popularmente como caneleiro, é uma espécie nativa que ocorre principalmente nas regiões Nordeste e Norte do Brasil, no bioma tropical sazonalmente seco (biomas Caatinga e Cerrado). Este estudo teve como objetivo ajustar e selecionar modelos estatísticos para estimar a biomassa seca de *C. macrophyllum*. Os dados foram coletados em um fragmento de vegetação nativa localizada no município de Cristino Castro, PI. Quinze árvores foram abatidas, separadas em compartimentos: fuste, galhos grossos e finos, folhas e raízes grossas e finas, e pesadas em campo. Amostras de cada compartimento foram coletadas e analisadas em laboratório para determinar o teor de umidade da madeira (todas as amostras) e a densidade básica (amostras de madeira do fuste, galhos e raízes). A volumetria foi calculada pelo método de Huber e fatores de expansão (FEB) e razão para estimativa da biomassa de raízes a partir do fuste também foram calculados. O FEB foi calculado a partir da relação entre a biomassa aérea e a biomassa do fuste. A razão de raízes (R) foi calculada pela divisão da biomassa da raiz pela biomassa aérea. Equações alométricas para estimativa da biomassa total (aérea e raízes) e biomassa aérea foram ajustadas avaliando diferentes modelos matemáticos. A seleção da melhor equação foi baseada nos valores do coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro padrão da estimativa (S_{yx}) e na análise gráfica dos resíduos. Após selecionar as equações para as variáveis de interesse, foi aplicado o teste de validação cruzada Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) para avaliar a eficiência e precisão de cada modelo em estimar os valores reais de cada variável. Foram utilizados a raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). A biomassa seca variou entre 17,3 e 267,2 kg, com média de 109,4 kg por árvore. A compartimentação da biomassa resultou na contribuição do fuste em 47,5% do total, seguido pelos galhos grossos (22,7%), galhos finos (10,9%), raízes grossas (13,0 %), raízes finas (1,9%) e folhas (4,1%). A biomassa aérea total pode ser estimada a partir da biomassa do fuste usando um fator de conversão médio de 1,79. A razão de raízes pela parte aérea da árvore apresentou média de 0,22. As

equações selecionadas para estimar a biomassa aérea e a biomassa total neste estudo foram provenientes do modelo de Takata: $Ba = D^2 \cdot H / (22,3507 + 0,2456 * D) + \varepsilon_i$ e de Spurr logaritimizado: $\ln(Bt) = -2,1128 + 0,8718 * \ln(D^2 H) + \ln(\varepsilon_i)$, apresentando estatísticas satisfatórias e distribuição dos resíduos sem tendência a subestimar a biomassa abaixo de 50 kg. Assim, os resultados apresentados poderão auxiliar na determinação indireta da biomassa e do estoque de carbono presente em florestas tropicais da região, especificamente para o caneleiro.

Palavras-chave: Equações alométricas, Florestas tropicais, Manejo florestal sustentável, Semiárido, Serviços ecossistêmicos.

ABSTRACT

Biomass compartmentalization in individual trees studies aim to contribute to understanding the role of biomass in carbon sequestration and the maintenance of ecosystem services. *Cenostigma macrophyllum* Tul., commonly known as "caneleiro" is a native species that occurs primarily in the Northeast and North Regions of Brazil, in the seasonally dry tropical biome (both the Caatinga and Cerrado biomes). This study aimed to fit and select statistical models to estimate the dry biomass of *C. macrophyllum*. Data were collected from a fragment of Caatinga vegetation in the municipality of Cristino Castro, PI. Fifteen trees were felled, separated into compartments: trunk, large and small branches, leaves, and large and fine roots, and weighed in the field. Samples from each compartment were collected and analyzed in the laboratory to determine wood moisture content (all samples) and basic density (only wood samples). Volumetric measurements were performed using the Huber method, and biomass expansion factors (BEF) and root-to-stem biomass ratios were also calculated. The BEF was obtained from the ratio between aboveground biomass and stem biomass. The root ratio (R) was calculated by dividing root biomass by aboveground biomass. Allometric equations for estimating total biomass (aboveground and roots) and aboveground biomass were fitted by evaluating different mathematical models. The best equation was selected based on adjusted coefficient of determination ($R^2_{adj.}$), standard error of estimate (Syx), and graphical analysis of residuals. After selecting the equations for the variables of interest, the Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) test was applied to evaluate each model's efficiency and accuracy in estimating the actual values of each variable. Root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) were used. Dry biomass ranged from 17.3 to 267.2 kg, with an average of 109.4 kg per tree. Biomass compartmentalization showed that the stem contributed 47.5% of the total, followed by coarse branches (22.7%), fine branches (10.9%), coarse roots (13.0%), fine roots (1.9%), and leaves (4.1%). Total aboveground biomass can be estimated from stem biomass using an average conversion factor of 1.79. The root-to-aboveground biomass ratio averaged 0.22. The selected equations for estimating total and aboveground biomass in this study were derived from the Takata model: $Ba = D^2 \cdot H / (22,3507 + 0,2456 \cdot D) + \varepsilon_i$ and the logarithmic form of the Spurr model:

$\ln(Bt) = -2,1128 + 0,8718 * \ln(D^2H) + \ln(\varepsilon_i)$, with satisfactory statistical performance and residual distributions without a tendency to underestimate biomass below 50 kg. Thus, the results presented may assist in the indirect determination of biomass and carbon stock in tropical forests of the region, specifically for the species *Cenostigma macrophyllum*.

Keywords: Allometric equations, Ecosystem services, Semiarid, Sustainable forest management, Tropical forests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A espécie <i>Cenostigma macrophyllum</i> Tul.....	24
Figura 2 - Localização da área de estudo e das árvores de <i>Cenostigma macrophyllum</i> , no município Cristino Castro, estado do Piauí, Brasil.....	26
Figura 3 - Procedimentos utilizados para amostragem da distribuição de biomassa das árvores de <i>Cenostigma macrophyllum</i>	28
Figura 4 - Distribuição gráfica dos resíduos para os modelos ajustados, apresentando os melhores e piores desempenhos de ajuste para a biomassa total estimada.....	37
Figura 5 - Distribuição gráfica dos resíduos para os modelos ajustados, apresentando os melhores e piores desempenhos de ajuste para a biomassa aérea estimada.....	38
Figura 6 - Valores de biomassa total observados em relação aos valores de biomassa total estimados com as equações alométricas desenvolvidas.....	39
Figura 7 - Valores de biomassa aérea observados em relação aos valores de biomassa aérea estimados com as equações alométricas desenvolvidas.....	39
Figura 8 - Comparação dos valores observados e estimados para a biomassa acima do solo utilizando a equação desenvolvida neste estudo (Modelo 2), juntamente com equações desenvolvidas anteriormente por Lima Júnior (2014) e Miguel (2014).....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos matemáticos avaliados para a estimativa da biomassa aérea e total de árvores de <i>Cenostigma macrophyllum</i> Tul.....	31
Tabela 2 - Valores mínimos e máximos, média e desvio padrão (S) das variáveis dendrométricas de 15 árvores de <i>Cenostigma macrophyllum</i>	33
Tabela 3 - Médias de biomassa seca total e carbono por compartimento de <i>Cenostigma macrophyllum</i>	34
Tabela 4 - Valores médios da biomassa total de <i>Cenostigma macrophyllum</i> por classe de diâmetro e compartimento.....	35
Tabela 5 - Média e desvio padrão da densidade básica e teor de umidade da madeira de <i>Cenostigma macrophyllum</i>	36
Tabela 6 - Coeficientes das equações alométricas desenvolvidas para estimar a biomassa de <i>Cenostigma macrophyllum</i>	37
Tabela 7 - Valores médios da raiz do erro quadrático médio (RMSE), do erro médio absoluto (MAE) e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) obtidos na validação cruzada de 15 vezes.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANOVA	Análise de Variância.
B	Biomassa.
BFG	The Brazil Flora Group.
C	Carbono.
CV	Coeficiente de Variação.
D	Diâmetro a Altura do Peito.
DB	Densidade Básica.
DBP	Densidade Básica Ponderada.
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
FC	Fator de Correção de Meyer.
FEB	Fator de Expansão de Biomassa.
H	Altura.
IBÁ	Instituto Brasileiro de Árvores.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
LOOCV	Leave-One-Out Cross-Validation.
MATOPIBA	Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia.
MMA	Ministério do Meio Ambiente.
NBR	Norma Brasileira.
NSE	Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável.
R	Razão de Raízes.
r	Correlação de Pearson.
R^2 aj.	Coeficiente de Determinação Ajustado.
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio.
S	Desvio Padrão.
MAE	Erro Médio Absoluto.
SNIF	Sistema Nacional de Informações Florestais.
Syx	Erro Padrão da Estimativa.
TU	Teor de Umidade.
UPAS	Unidades Produtivas Anuais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo Geral.....	16
2.2	Objetivos Específicos.....	16
3	REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	17
3.1	Biomassa florestal.....	17
3.2	Estoque de carbono florestal.....	18
3.3	Quantificação da biomassa e estoques de carbono.....	19
3.4	Métodos diretos para quantificação de biomassa das raízes.....	20
3.5	Densidade básica da madeira.....	21
3.6	Relações alométricas.....	22
3.7	Descrição da espécie <i>Cenostigma macrophyllum</i> Tul.....	22
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
4.1	Caracterização da área de estudo.....	25
4.2	Coleta de dados.....	27
4.3	Determinação do teor de umidade e densidade básica da madeira...	29
4.4	Determinação dos estoques de biomassa e carbono.....	30
4.5	Fator de expansão de biomassa e razão de raízes.....	30
4.6	Análise de dados.....	31
4.7	Ajuste das equações alométricas.....	31
5	RESULTADOS.....	33
5.1	Estatísticas descritivas.....	33
5.2	Partição da biomassa e carbono.....	34
5.3	Densidade básica e teor de umidade da madeira.....	35
5.4	Equações alométricas.....	36
6	DISCUSSÃO.....	42
6.1	Partição da biomassa.....	42
6.2	Densidade básica e teor de umidade da madeira.....	45
6.3	Equações alométricas.....	47
7	CONCLUSÕES.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

A segunda maior área florestal do mundo encontra-se no Brasil, totalizando 495,83 milhões de hectares, o que representa cerca de 58,3% de sua área total (SNIF, 2024). Esta vasta área florestal é composta principalmente por florestas nativas, que totalizam área de 485,8 milhões de hectares (IBÁ, 2023). Além disso, o país conta com grandes áreas de florestas tropicais secas, pertencentes a biomas com características singulares, como o Cerrado e a Caatinga, reconhecidos por sua rica biodiversidade e ecossistemas complexos (EMBRAPA, 2021).

A Caatinga se destaca, dentre os demais biomas, por ser o único exclusivamente brasileiro, com espécies endêmicas adaptadas as condições climáticas semiáridas, já o Cerrado é considerado a savana tropical de maior biodiversidade do planeta, com 12.829 espécies de plantas nativas catalogadas (BFG, 2021; MMA, 2024). A área de transição entre esses biomas constitui um espaço de contato ecológico, com espécies dos dois ambientes coexistindo, gerando um mosaico de vegetação essencial para a conservação da biodiversidade.

Contudo, nas últimas décadas, os biomas brasileiros passaram por uma drástica redução de sua cobertura vegetal, com cerca de 500 mil km² desmatados, sendo os biomas Amazônia e Cerrado os mais afetados. A Caatinga, embora menos impactada em termos absolutos, também registrou redução de 26,7 mil km² (IBGE, 2020). Essa degradação florestal, impulsionada principalmente pela expansão da fronteira agrícola e pela pecuária extensiva (IBGE, 2024), resulta em alterações severas na qualidade do solo, comprometendo assim a dinâmica das comunidades vegetais.

Além do valor econômico, as florestas tropicais são fundamentais para mitigar as mudanças climáticas, armazenar carbono e conservar a biodiversidade (Koch; Kaplan, 2022). De acordo com o Relatório Anual do IBÁ (2023), o Brasil estocou aproximadamente 1,82 bilhões de toneladas de CO₂eq em florestas produtivas e 2,98 bilhões de toneladas em florestas naturais destinadas à conservação.

Os ecossistemas florestais são considerados como drenos de carbono atmosférico (Bird, 2010; Salami *et al.*, 2023), contendo uma fração significativa de biomassa nesse armazenamento. O estoque de carbono é influenciado por uma combinação de fatores bióticos e abióticos, como disponibilidade de água e nutrientes, competição entre espécies, práticas de manejo florestal e condições ambientais

(Kupper, 2023). A biomassa aumenta de acordo com o crescimento e desenvolvimento das árvores, resultando em um maior estoque de carbono (Lindner; Karjalainen, 2007; Kupper, 2023), reforçando a importância da conservação florestal no ciclo de carbono global.

A alocação eficiente da biomassa pode determinar a sobrevivência das espécies em ambientes com baixo potencial produtivo. Em condições de limitação de água ou nutrientes no solo, as raízes ficam com acúmulo de biomassa, enquanto, em ambientes com baixa disponibilidade de luz, a alocação da biomassa é direcionada para as partes acima do solo (Lustosa, 2015). Compreender como a biomassa é alocada em resposta às variáveis ambientais é essencial para prever o crescimento florestal, otimizar o sequestro de carbono e adaptar as florestas às mudanças climáticas. Isso garante a sustentabilidade dos serviços ecossistêmicos e a resiliência dos ecossistemas florestais.

A avaliação de formações de florestas é por meio de quantificação precisa da biomassa, empregada para diversos propósitos, por ser uma ferramenta fundamental, como por exemplo, avaliar o sequestro de carbono, a ciclagem de nutrientes (Behling *et al.*, 2014; Virgens *et al.*, 2017) e os impactos ambientais decorrentes da remoção da biomassa (Lima *et al.*, 2016; Virgens *et al.*, 2017). Essa abordagem é particularmente relevante em ecossistemas sensíveis às condições ambientais adversas, como a Caatinga e o Cerrado, que enfrentam crescente pressão do desmatamento, especialmente na região de transição com o MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). Reforçando a necessidade de estimativas precisas para avaliar o potencial de mitigação de carbono das espécies remanescentes, tendo em vista que a expansão agrícola nessas áreas, resulta numa vasta perda de vegetação nativa.

A estimativa de biomassa é realizada por meio de dois métodos, o direto (destrutivos, com derrubada e pesagem) ou indireto (não destrutivos). Os diretos são mais precisos, mas inviáveis em larga escala devido ao custo e tempo exigidos. No método indireto, equações alométricas disponíveis na literatura são utilizadas, evitando assim a necessidade de amostragem destrutiva. Embora a quantificação de biomassa seja mais rápida e menos dispendiosa, sua precisão é menor em comparação com o método direto (Miranda, 2008; Ratuchne *et al.*, 2016).

O manejo florestal afeta diretamente a quantidade de carbono armazenado na floresta. A estimativa do estoque da biomassa florestal pode ser realizada multiplicando o valor da biomassa pelo conteúdo de carbono. Esse conteúdo de carbono, amplamente adotado em estudos, é de aproximadamente 50% do peso total da biomassa, representando uma média de dados obtidos em diversas pesquisas. No entanto, esse valor pode resultar em superestimação ou subestimação, dependendo do tipo de vegetação (Kauffman *et al.*, 2009; Dallagnol *et al.*, 2011; Keith *et al.*, 2014; Watzlawick *et al.* 2014; Silva *et al.* 2015; Xu *et al.*, 2016; Behera *et al.*, 2017; Salami *et al.*, 2023).

A espécie arbórea *Cenostigma macrophyllum* é nativa no Brasil e possui importância econômica nas regiões onde ocorre, reconhecida por sua importância na recuperação de áreas degradadas, na manutenção dos serviços ambientais, na qualidade de sua madeira e em suas propriedades medicinais, além de sua contribuição para a biodiversidade e para projetos de captura de carbono. No entanto, o avanço do desmatamento e a transformação de florestas em áreas agrícolas têm colocado em risco sua sobrevivência no longo prazo (Souza; Nascimento, 2018).

Assim, este estudo teve como objetivo analisar a distribuição da biomassa entre os diferentes compartimentos (fuste, galhos, folhas e raízes) e avaliar modelos matemáticos e fatores alométricos, tais como fator de expansão de biomassa (FEB) e a razão de raízes, para estimar a biomassa de *C. macrophyllum* com base em dados coletados de quinze árvores localizadas no município de Cristino Castro, Piauí.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a distribuição da biomassa em diferentes compartimentos e ajustar equações alométricas para estimar o carbono e a biomassa (acima do solo e total) em árvores de *Cenostigma macrophyllum* Tul.

2.2 Objetivos Específicos

Determinar a densidade básica da madeira nos compartimentos: galhos grossos, fuste principal e raízes grossas.

Determinar o teor de umidade nos compartimentos: folhas, galhos finos, galhos grossos, fuste principal, raízes finas e raízes grossas.

Avaliar e testar modelos volumétricos e fatores que permitam estimar o volume e a biomassa em diferentes compartimentos de *C. macrophyllum*.

Mensurar a razão do sistema radicular e o fator de expansão para estimativas de biomassa a partir do volume do fuste e da densidade da madeira.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 Biomassa florestal

Biomassa florestal compreende a massa total de organismos vivos em um ecossistema florestal, quantificável em termos de matéria seca (MS), matéria fresca (MF) ou conteúdo de carbono (Alemdag, 1980; Miranda, 2008). Esta biomassa é constituída por componentes lenhosos (árvores, arbustos), não lenhosos (herbáceas, epífitas), detritos vegetais e fluidos biológicos de origem vegetal (Orellana, 2015). De acordo com Sanquetta (2002) o termo biomassa florestal pode designar toda a biomassa existente numa área florestal ou apenas um fragmento, além de fitomassa arbórea (exclusivamente para indivíduos lenhosos) ou fitomassa florestal (vegetação total).

As espécies florestais apresentam a capacidade de fixar carbono por períodos prolongados (anos ou décadas), armazenando-o em seus tecidos vegetais (Litton *et al.*, 2007). Os estudos sobre biomassa e estoques de carbono objetivam-se: (i) quantificar a ciclagem biogeoquímica de nutrientes, (ii) estimar o potencial energético da biomassa lenhosa e (iii) subsidiar pesquisas sobre dinâmica do sequestro de carbono (Bastos *et al.*, 2019).

Na quantificação da biomassa florestal são utilizados métodos diretos e indiretos. No método direto, os protocolos de campo adotados podem apresentar variações significativas em função dos objetivos do estudo e das limitações técnicas e orçamentárias inerentes à pesquisa. Quanto ao método indireto, sua aplicação requer obrigatoriamente a calibração prévia de equações alométricas, sendo imprescindível sua utilização em conjunto com abordagens diretas para validação (Sanquetta, 2002). Assim, para utilização de diferentes metodologias de quantificação da biomassa de ecossistemas florestais deve-se compatibilizar o uso de métodos diretos (destrutivos) e indiretos (não destrutivos) utilizando equações alométricas e ferramentas de sensoriamento remoto como alternativas (Watzlawick, 2003).

A dinâmica da biomassa frente a distintas tipologias florestais, estádios sucessionais e regimes de manejo deve ser considerada, assegurando que as estimativas abranjam todos os compartimentos do ecossistema e suas variações temporais. Deve-se, assim, buscar metodologias adequadas para que todos os

componentes sejam quantificados e incorporados nas estimativas do balanço geral de biomassa e de carbono fixado (Sanquetta, 2002; Watzlawick, 2003).

3.2 Estoque de carbono florestal

O carbono constitui o elemento fundamental das moléculas orgânicas e integra a estrutura química dos principais gases de efeito estufa: metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), hidrofluorcarbonetos (HFCs) e perfluorcarbonetos (PFCs) (Miranda, 2008).

O incremento nas concentrações atmosféricas de CO₂ e as alterações climáticas em escala global têm intensificado significativamente a atenção sobre o carbono referente aos seus estoque e fluxo nas florestas (Bert; Danjon, 2006; Orellana, 2015). O dióxido de carbono, como principal gás de efeito estufa, circula entre os quatro principais reservatórios globais de carbono: atmosfera, oceanos, reservas de combustíveis fósseis, e a biomassa vegetal associada aos estoques pedológicos (Chang, 2004; Miranda, 2008)

Os ecossistemas florestais desempenham função crucial na regulação dos estoques globais de carbono, pois armazenam mais carbono nas árvores e no solo do que existe atualmente na atmosfera (Miranda, 2008). Quando as florestas são derrubadas, a maior parte do carbono armazenado nas árvores é liberada para a atmosfera, seja rapidamente pela combustão ou mais lentamente por meio da decomposição (Houghton, 1994; Miranda, 2008).

A conservação e expansão de florestas naturais e plantadas tem sido aceita como de importância primordial para reduzir os níveis de CO₂ da atmosfera (Rochadelli, 2001). Todas as plantas absorvem CO₂ e o convertem em carboidratos na forma de tecidos da madeira, folhas, sementes e frutas (Miranda, 2008). Considerando a importância de compostos de carbono na composição da biomassa da floresta, estudos relacionados à sua quantificação nos diferentes compartimentos da planta são importantes para possibilitar compreensão da dinâmica do carbono na atmosfera e seu sequestro pelas florestas (Watzlawick *et al.* 2004).

3.3 Quantificação da biomassa e estoques de carbono

A quantificação da biomassa constitui etapa fundamental para a determinação dos estoques de carbono em ecossistemas florestais. Os métodos empregados para essa finalidade dividem-se em diretos e indiretos. Os métodos diretos envolvem determinações precisas, enquanto os indiretos baseiam-se em estimativas. Devido à inviabilidade operacional de determinações diretas em grandes áreas, estas restringem-se a parcelas amostrais, cujos dados servem para calibração de modelos de estimativa (Sanquetta, 2002; Miranda, 2008).

Na prática, a biomassa é determinada pela massa verde (material fresco) ou massa seca (material dessecado em estufa), sendo esta última a base para cálculos de carbono (Caldeira, 2003; Ratuchne, 2016). Conforme Miranda (2008), a estimativa confiável do carbono sequestrado requer a mensuração exata da biomassa, diferenciando entre seus compartimentos (raízes, tronco, galhos e folhas), os quais apresentam teores de carbono diferenciados. Estudos recentes têm priorizado amostragens destrutivas seguidas de ajuste de modelos alométricos para essa finalidade.

A quantificação de biomassa e carbono é imprescindível para avaliar o potencial mitigador de espécies e ecossistemas (Marcos *et al.*, 2020). Além de ser o principal indicador de estoques de carbono, a biomassa permite avaliar a produtividade florestal sob perspectivas econômicas e ambientais. Os métodos de estimativa fundamentam-se principalmente em informações provenientes do inventário florestal, utilizando equações que convertem variáveis dendrométricas (diâmetro, altura, volume) em biomassa (Somogyi *et al.*, 2007; Ratuchne, 2016).

Para a determinação da biomassa é necessária uma amostragem destrutiva da árvore (método direto), em que a biomassa arbórea é obtida a partir da pesagem de seus componentes em campo, tais como folhas, flores e frutos, galhos e raízes, subdividindo-os em galhos com espessuras diferentes e em raízes finas e grossas, o que implica numa medição real feita diretamente na biomassa. A separação e especificação desses componentes varia de acordo com o tipo de povoamento e os objetivos a serem alcançados (Ratuchne, 2016).

Os métodos diretos consistem na coleta destrutiva de árvores, seguida da pesagem realizada diretamente no campo de todos os componentes (folhas, galhos,

raízes etc.), segregados por classes de diâmetro e tipo de tecido. A especificidade da compartimentação varia conforme o povoamento e os objetivos do estudo (Ratuchne, 2016). E métodos indiretos utilizam relações matemáticas entre biomassa e variáveis dendrométricas (DAP, altura) ou dados de sensoriamento remoto, dispensando a coleta destrutiva. As estimativas derivam de regressões ou algoritmos aplicados a inventários florestais (Higuchi; Carvalho, 1994).

3.4 Métodos diretos para quantificação de biomassa das raízes

A determinação da biomassa radicular representa uma das etapas mais complexas e trabalhosas nos estudos de biomassa florestal, principalmente devido à necessidade de escavação, que pode exigir vários dias para sua completa execução (Sanquetta, 2002). Em áreas onde ainda não existem dados consolidados sobre a biomassa subterrânea, os métodos diretos (destrutivos) são os mais recomendados, enquanto em locais com informações prévias, os métodos indiretos se mostram mais apropriados (Ratuchne, 2016).

Entre os principais métodos de amostragem para avaliação da biomassa de raízes, destaca-se a escavação, técnica amplamente utilizada em florestas plantadas e para árvores individuais. Este método envolve a exposição total ou parcial do sistema radicular através da remoção do solo, permitindo uma quantificação precisa e a avaliação da distribuição espacial das raízes. Contudo, apresenta algumas limitações significativas, como a elevada demanda de mão de obra e tempo, tornando-o financeiramente dispendioso (Ratuchne, 2016). Na prática, delimita-se uma área de amostragem ao redor da árvore, que pode ter formato quadrado ou circular, com dimensões variando entre 1 e 3 metros, dependendo da espécie e dos objetivos do estudo. É importante ressaltar que a maior parte das raízes finas (mais de 70%) se concentra nos primeiros 100 cm de profundidade do solo (Sanquetta, 2002).

Para a determinação da biomassa pelo método da escavação é fixado uma área de amostragem ao longo da árvore-amostra. Essa área pode ser em formato quadrado ou circular, com dimensões variáveis de 1 m, 2 m ou 3 m a depender da espécie ou do objetivo (Sanquetta, 2002). Em geral a maior parte das raízes finas (70% ou mais) encontra-se fixada até 1 m de profundidade do solo.

Alternativamente, o método dos monolitos consiste na coleta de blocos de solo contendo o sistema radicular, que podem apresentar formatos variados (retangular, quadrado ou circular). Após a extração, procede-se à separação das raízes por classes de diâmetro (grossas e finas) ou por horizontes de profundidade (0-10 cm, 10-20 cm, etc.), conforme os objetivos específicos da pesquisa (Ratuchne, 2016). Esta técnica oferece um equilíbrio entre precisão e viabilidade operacional.

A tradagem surge como uma opção menos invasiva, utilizando trados de volume conhecido para coletar amostras de solo contendo raízes, sem a necessidade de escavações extensivas. Este método permite uma padronização na amostragem, com flexibilidade nas dimensões do equipamento, sendo particularmente útil em estudos que requerem múltiplas amostras ao longo de uma área (Ratuchne, 2016).

3.5 Densidade básica da madeira

A densidade básica corresponde à proporção da massa seca de madeira e o volume de madeira verde ou saturada. Considerada uma das propriedades físicas mais importante da madeira, a densidade básica pode ser correlacionada com outras características da madeira e com seu potencial de uso. Além disso, ela influencia diretamente a logística envolvida no transporte e no armazenamento, uma vez que impacta o manuseio e a eficiência desses processos (Nogueira, 2007).

As variações na densidade da madeira decorrem das diferenças nas dimensões das fibras e da quantidade de constituintes extraídos por unidade de volume. A densidade básica pode apresentar diferenças entre gêneros, entre espécies pertencentes ao mesmo gênero, entre indivíduos de uma mesma espécie e até dentro de uma mesma árvore (Orellana, 2015). Além disso, os valores da densidade básica da madeira podem sofrer alterações conforme a posição no fuste, tanto no sentido radial quanto no longitudinal. Essas variações podem manifestar-se de forma continuamente decrescente da base ao ápice, decrescente até a região intermediária do tronco e, subsequentemente, crescente até o topo, crescente ao longo de todo o comprimento do tronco, ou ainda sem variações estatisticamente significativas ao longo do fuste (Orellana, 2015).

3.6 Relações alométricas

Alometria é o estudo das proporções entre diferentes partes de um organismo em relação ao seu tamanho total. Ou seja, trata-se da variação nas proporções de diferentes partes de organismos vivos que ocorre como consequência do seu crescimento (Weber, 2007; Miranda, 2008).

As relações alométricas são verificadas pela identificação da forma e da significância da relação funcional entre duas ou mais variáveis. O método mais utilizado para descrever essas relações é a análise de regressão, que permite estimar a relação funcional entre uma variável dependente (Y) e uma variável independente (X), definindo o valor médio esperado de Y em função de X (Niklas, 1994; Miranda, 2008).

Uma das abordagens para a estimativa da biomassa e do carbono florestal é por meio da utilização de modelos matemáticos. Um modelo consiste em uma representação, física, matemática ou conceitual, de aspectos estruturais ou funcionais de sistemas reais. Pode assumir diversas formas, como equações que expressam processos fisiológicos ou representações visuais, a exemplo de figuras e maquetes (Sanquetta, 1996; Miranda, 2008).

Segundo Miranda (2008), os modelos possuem limitações. Um modelo biológico não é necessariamente correto ou incorreto, mas sim uma aproximação da realidade que pode representar melhor ou pior os fenômenos observados. Embora constituam apenas aproximações da realidade, os modelos são ferramentas essenciais nas ciências exatas e naturais, permitindo estimar e prever o comportamento atual e futuro de variáveis ou sistemas mensuráveis.

3.7 Descrição da espécie *Cenostigma macrophyllum* Tul.

Dentre as dicotiledôneas, a família Leguminosae (Fabaceae) é uma das que mais contém espécies, com aproximadamente 19.500 espécies distribuídas em mais de 730 gêneros (Lewis, 2005; LPWG, 2017). As leguminosas são reconhecidas pela capacidade de fixar nitrogênio no solo por meio de uma associação simbiótica com bactérias do gênero *Rhizobium*, processo crucial em solos pobres em nutrientes como

os dos biomas Cerrado e Caatinga. Esse processo aumenta a fertilidade do solo e promove a recuperação de áreas degradadas (Santos; Silva; Barbosa, 2020).

O gênero *Cenostigma*, parte da subfamília Caesalpinioideae, inclui espécies adaptadas a regiões tropicais e subtropicais, desempenhando um papel importante na restauração de paisagens degradadas. Este gênero é composto por 14 espécies, com alta diversidade no Nordeste do Brasil, especialmente no domínio da Caatinga, onde muitas de suas espécies compartilham um nicho ecológico semelhante e ocorrem em simpatria (Castro *et al.*, 2024).

A espécie *Cenostigma macrophyllum*, popularmente conhecida como “canela-de-velho” ou “caneleiro”, é nativa do Brasil e ocorre naturalmente nos ecossistemas da Caatinga e do Cerrado, sendo relativamente comum na região centro-sul do Piauí (Aguilar *et al.*, 2016; Silva; Ferreira; Moura, 2021). Considerando sua resistência à seca e capacidade de fixação de nitrogênio, a espécie *C. macrophyllum* tem potencial de ser aplicada em sistemas agroflorestais ou em projetos de reflorestamento (Ribeiro *et al.*, 2021). Tais características conferem à espécie um importante papel na recuperação da fertilidade do solo e na promoção de sistemas agrícolas sustentáveis em áreas degradadas ou vulneráveis à degradação.

C. macrophyllum também tem grande valor medicinal. A planta é amplamente utilizada na medicina popular para tratar doenças como gastrite, úlceras e infecções respiratórias (Santos, 2001; Lira, 2010; Almeida *et al.*, 2019). Estudos recentes identificaram compostos bioativos em sua casca, como flavonoides e taninos, que possuem propriedades anti-inflamatórias e antioxidantes (Silva *et al.*, 2007). O uso medicinal da planta foi documentado ao longo dos anos e recentemente confirmado por pesquisas científicas (Santos, 2001; Silva *et al.*, 2007; Alves *et al.*, 2012; Santos; Silva; Barbosa, 2020).

A espécie desempenha um papel multifuncional em ecossistemas semiáridos e em projetos de recuperação ambiental. Sua capacidade de fixar nitrogênio no solo contribui significativamente para a melhoria da fertilidade em solos pobres, tornando-a uma espécie essencial para a regeneração de áreas degradadas. A resistência à seca, combinada com sua capacidade de atrair polinizadores, como abelhas e pássaros, torna esta espécie uma escolha ideal para projetos de reflorestamento.

C. macrophyllum possui grande valor ornamental e é frequentemente utilizada na arborização urbana. Em Teresina, capital do estado do Piauí, essa espécie foi

selecionada como árvore símbolo do município, conforme estabelecido pelo Decreto Municipal nº 2.407, de 13 de agosto de 1993. A escolha desta árvore para projetos de arborização reflete tanto seu significado cultural quanto sua resistência, bem como sua capacidade de embelezar as paisagens urbanas.

C. macrophyllum é uma espécie arbórea de comportamento decíduo, com porte arbóreo, que pode atingir até 35 m de altura e diâmetro à altura do peito de 20 a 50 cm (Souza; Nascimento, 2018). A árvore é dotada de copa alongada ou piramidal, o tronco é ereto e cilíndrico, apresentando caneluras longitudinais estreitas e profundas (Lorenzi, 1998). A casca apresenta manchas cinzentas claras alternadas com manchas escuras. As folhas são alternas, compostas paripinadas, com folíolos opostos e coriáceos. As flores são reunidas em inflorescências terminais racemosas e o fruto apresenta-se como uma vagem lenhosa, medindo entre 8 e 16 cm de comprimento que contém de 2 a 4 sementes (Machado *et al.*, 2006) (Figura 1).



Figura 1 - A espécie *Cenostigma macrophyllum* Tul.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Aracajú, localizada no município de Cristino Castro, na microrregião do Alto Médio Gurguéia, no estado do Piauí, Brasil (Figura 2). A fazenda possui área total equivalente a 5.248,79 hectares e está situada em uma zona de transição ecológica entre os biomas Caatinga e Cerrado, é coberta por vegetação nativa e é utilizada para a extração de madeira para energia, seguindo os princípios do manejo florestal sustentável. A área é dividida em quinze Unidades de Produção Anual (UPAs), permitindo tempo para a regeneração da vegetação, o que é crucial para a preservação da biodiversidade da fazenda e para garantir a sustentabilidade da extração de madeira.

A região objeto de pesquisa está localizada no ecótono entre os biomas Caatinga e Cerrado Brasileiro. O tipo de vegetação predominante na região é a Floresta Tropical Sazonalmente Seca, também caracterizada como caatinga sedimentar, que ocorre em terrenos sedimentares com solos profundos, pobres e arenosos (Nazareno *et al.*, 2021; Queiroz; Freire, 2017). O clima é classificado como Aw segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, caracterizado por invernos secos e verões chuvosos, com temperatura média de cerca de 26,9 °C e precipitação média anual de 867,6 mm (INMET, 2023).

A vegetação da área apresenta características que lhe conferem resistência a ambientes semiáridos, com algumas espécies apresentando adaptações morfológicas, tais como, folhas pequenas e sistemas radiculares profundos, o que lhes permite extrair água de camadas mais profundas do solo. A presença de espécies do Cerrado aumenta a biodiversidade e a complexidade da paisagem, aumentando o valor ecológico da área. O tipo de solo predominante na região é o latossolo vermelho-amarelo, ácido e de baixa fertilidade (Aguiar; Gomes, 2004). Em solos desse tipo, a baixa fertilidade do solo pode constituir um desafio significativo para o manejo florestal sustentável. No entanto, o acúmulo de serapilheira, composta por materiais orgânicos como folhas e galhos caídos na superfície do solo, ajuda a conservar nutrientes, prevenir a erosão e melhorar a estrutura do solo, promovendo a regeneração de espécies vegetais.

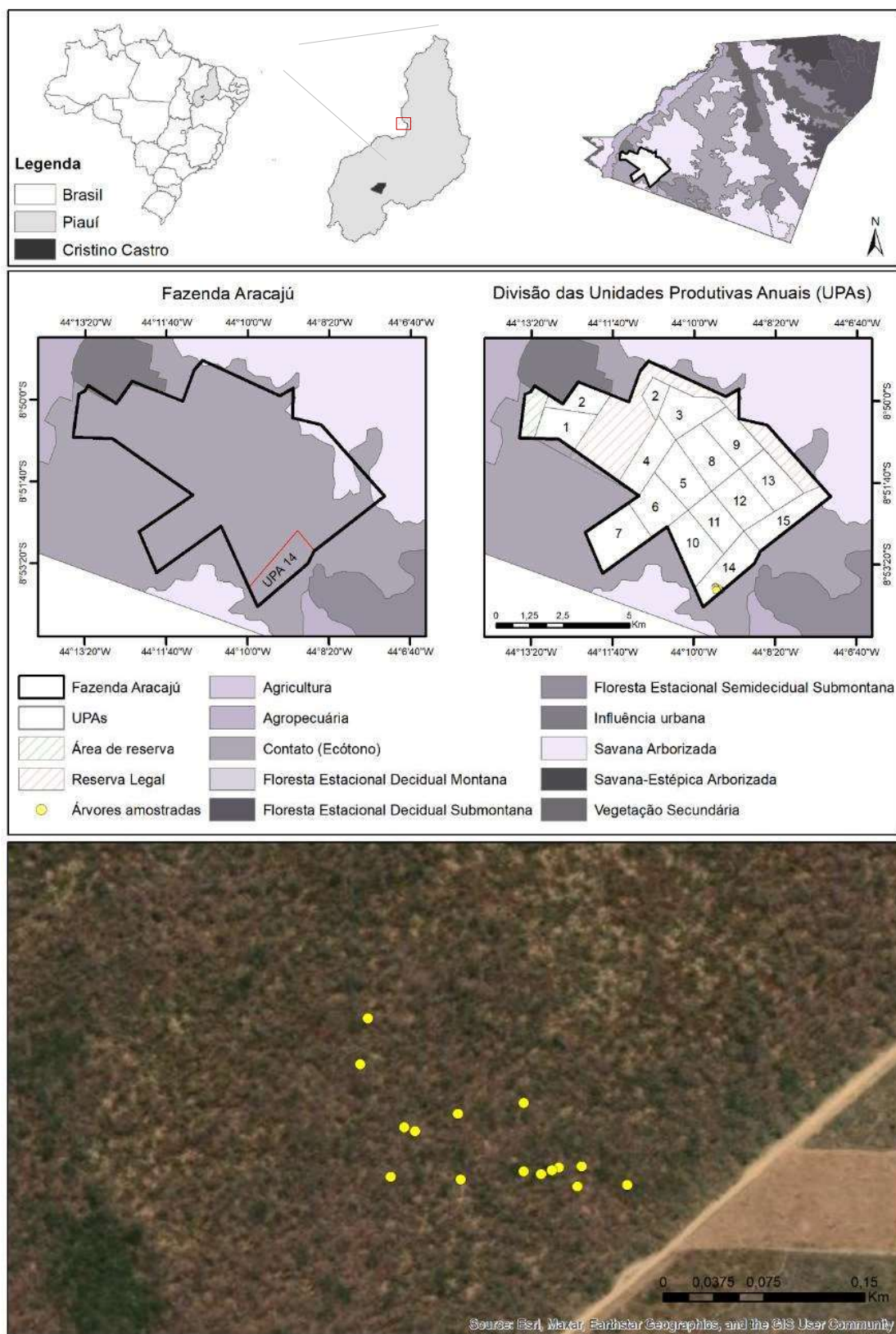


Figura 2 - Localização da área de estudo e das árvores de *Cenostigma macrophyllum*, no município Cristino Castro, estado do Piauí, Brasil.

4.2 Coleta de dados

A espécie arbórea *Cenostigma macrophyllum*, popularmente conhecida como “canela-de-velho” ou “caneleiro”, foi selecionada para este estudo com base na sua abundância e distribuição na área, além de sua importância fitossociológica e potencial econômico (Ribeiro *et al.*, 2021). A coleta de dados foi realizada de dezembro de 2022 a janeiro de 2023. Foram selecionadas 15 árvores, agrupadas em três classes de diâmetro, com amplitude variando de 7,8 cm a 26,9 cm, contendo cinco árvores em cada classe. Antes da derrubada, as árvores tiveram seu diâmetro à altura do peito (D) e altura total (H) mensurados por meio de fita diamétrica e hipsômetro Trupulse®, respectivamente. As alturas do toco e do fuste foram obtidas após a derrubada, empregando uma fita métrica e uma trena, respectivamente.

Para determinar o volume individual de cada árvore, foi realizada a cubagem rigorosa utilizando a metodologia de Huber (Husch, 2003). Os diâmetros ao longo do fuste foram medidos nas posições de 0,3 m, 1,0 m, 1,3 m, 2 m acima do nível do solo e, a partir desse ponto, as seções foram medidas a cada metro até a posição do diâmetro mínimo de 3 cm da extremidade da copa da árvore.

Em seguida, cada árvore foi segmentada nos compartimentos: folhas, galhos grossos (≥ 3 cm), galhos finos (< 3 cm), fuste principal, raízes grossas (≥ 3 cm) e raízes finas (< 3 cm). As raízes foram escavadas em um raio de 1 m do toco e a uma profundidade de até 0,8 m. Durante a extração do toco e escavação das raízes, os primeiros 5 cm de solo foram descartados devido à dificuldade de identificar se eram de fato raízes da espécie estudada. As raízes visíveis foram removidas, e impurezas como partículas de solo foram descartadas com auxílio de peneira. Após a fragmentação dos diferentes compartimentos, suas respectivas biomassas frescas foram obtidas pesando-as separadamente em uma balança digital com capacidade máxima de 300 kg.

Após o corte das árvores, extração das raízes e obtenção da massa verde total de cada componente, foram retiradas de cada árvore as seguintes amostras: discos de madeira em diferentes posições ao longo do fuste da árvore (0%, 25%, D, 50%, 75% e 100% da altura comercial, definida no ponto onde o fuste atinge diâmetro de 3 cm), dois discos de madeira em posições relativas de 25% e 75% da altura comercial de três galhos grossos selecionados aleatoriamente na árvore, dois discos de madeira

em posições relativas de 25% e 75% da altura comercial de três raízes grossas selecionadas aleatoriamente na árvore e duas amostras de cerca de 300 g de cada compartimento restante. As amostras foram levadas para o laboratório de Tecnologia da Madeira da UFPI para determinação do teor de umidade e da densidade básica da madeira. Os pesos totais dos compartimentos verdes foram obtidos em campo, e as amostras coletadas foram pesadas antes e após de efetuar a secagem em estufa de circulação forçada de ar. Os discos foram secos a 70 °C, enquanto as amostras de raízes, galhos finos e folhas foram secas a 65 °C até estabilização do peso (Figura 3).

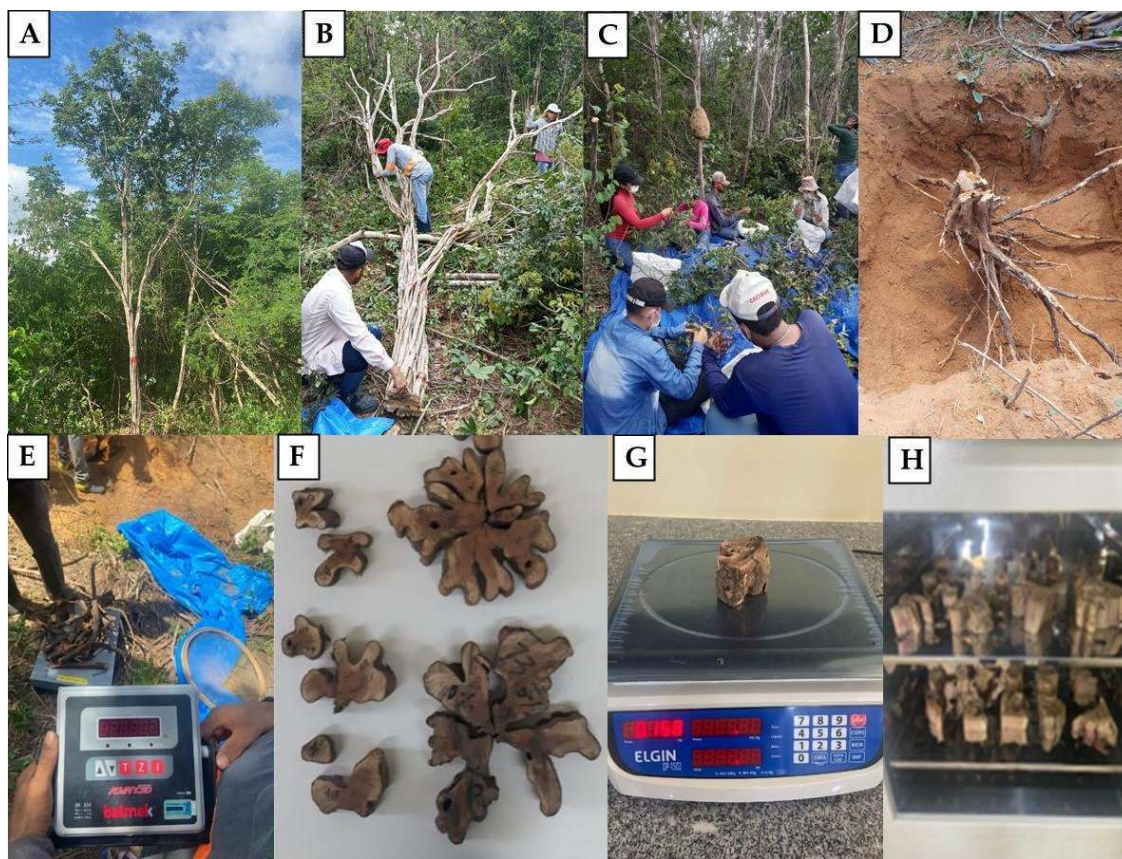


Figura 3 - Técnicas aplicadas para a amostragem e avaliação da distribuição da biomassa das árvores de *Cenostigma macrophyllum*, incluindo: A) seleção das árvores; B) derrubada das árvores; C) divisão dos diferentes compartimentos de biomassa; D) escavação das raízes; E) pesagem dos componentes das árvores no campo para obtenção da massa fresca total; F) coletas de discos; G) pesagem dos discos; e H) secagem das amostras em estufa.

4.3 Determinação do teor de umidade e densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira foi avaliada de acordo com a NBR 11.941 (ABNT, 2003), Calculada como a relação entre a massa seca e o volume saturado. Na determinação do volume de madeira saturada, as amostras foram submersas em água por um período de duas semanas. Para garantir que as amostras atingissem a saturação, foi aplicado vácuo nas amostras usando uma bomba de vácuo acoplada a um dessecador. O volume saturado foi determinado pelo método de deslocamento de água (Princípio de Arquimedes), obtido pela pesagem das amostras em balança de precisão 0,1 g. Para determinação da massa seca, as amostras foram pesadas e levadas a uma estufa de secagem a uma temperatura de 105 ± 2 °C. Após 24 horas, as amostras foram pesadas em intervalos regulares de 6 horas até a obtenção de massa constante.

A partir da densidade básica das amostras representativas dos compartimentos lenhosos (fuste principal, galhos grossos e raízes,), a equação (1) foi utilizada para obtenção da densidade básica média ponderada por volume das árvores.

$$DBP_{FUSTE} = \frac{\left(\frac{d_0+d_{25}}{2}\right)V_1 + \left(\frac{d_{25}+d_{50}}{2}\right)V_2 + \left(\frac{d_{50}+d_{75}}{2}\right)V_3 + \left(\frac{d_{75}+d_{100}}{2}\right)V_4}{V_1+V_2+V_3+V_4} \quad (1a)$$

$$DBP_{GALHO} = \frac{(d_{25})V_1 + (d_{75})V_2}{V_1+V_2} \quad (1b)$$

$$DBP_{RAIZ} = \frac{(d_{25})V_1 + (d_{75})V_2}{V_1+V_2} \quad (1c)$$

em que: DBP = densidade básica média ponderada (kg.m^{-3}); d = densidade básica da madeira da amostra (kg.m^{-3}); V = volume de madeira da seção (m^3).

O teor de umidade dos componentes arbóreos foi determinado de acordo com a equação (2).

$$TU\% = \left(\frac{Mu(a) - Ms(a)}{Ms(a)} \right) * 100 \quad (2)$$

em que: $TU\%$ = teor de umidade; $Mu(a)$ = massa úmida da amostra do componente (g.m^{-3}); $Ms(a)$ = massa seca da amostra do componente (g.m^{-3}).

4.4 Determinação dos estoques de biomassa e carbono

A biomassa seca dos componentes arbóreos: folhas, galhos (grossos ≥ 3 cm e finos < 3 cm), fuste principal e raízes (raízes finas < 3 cm e raízes grossas ≥ 3 cm) foi obtida pela diferença entre o peso verde de campo e o teor de umidade de cada componente (Equação 3). A biomassa total da árvore foi obtida pelo somatório da biomassa seca dos componentes fuste, galhos, folhas e raízes.

$$B = P_{U(c)} - \frac{P_{U(c)} * TU\%}{100} \quad (3)$$

em que: B = biomassa do compartimento (kg); $P_{U(c)}$ = massa úmida total do componente (kg) e TU% = teor de umidade.

A quantidade de carbono estocado na biomassa foi estimada por meio da multiplicação da biomassa seca pelo fator de conversão (0,50), conforme estabelecido pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006) que considera que a biomassa seca contém aproximadamente 50% de carbono.

4.5 Fator de expansão de biomassa e razão de raízes

Para calcular o fator de expansão da biomassa (FEB) e a razão de raízes (R), foram utilizadas as equações recomendadas pelo IPCC (2006), Equação 4, e Sanquetta *et al.* (2019), Equação 5.

$$FEB = \frac{b_{copa} + b_{fuste}}{b_{fuste}} = \frac{b_{aérea}}{b_{fuste}} \quad (4)$$

$$R = \frac{b_{raiz}}{b_{aérea}} \quad (5)$$

em que: FEB = fator de expansão da biomassa; R = razão de raízes; $b_{aérea} = b_{fuste} + b_{galho} + b_{folha}$ (kg); $b_{copa} = b_{galho} + b_{folha}$ (kg); b_{fuste} = biomassa do fuste (kg); b_{raiz} = biomassa da raiz (kg).

4.6 Análise de dados

Para a análise dos dados, foram realizadas estatísticas descritivas sobre as variáveis biométricas para resumir e caracterizar os dados. Os dados de biomassa foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificar se havia diferenças significativas nos compartimentos e nas classes de diâmetro. Quando a interação foi significativa, o teste de Tukey com nível de significância 95% foi aplicado para comparar as médias dos diferentes compartimentos das árvores e diferentes classes diamétricas. Em seguida, foi efetuada a análise de correlação do diâmetro e da altura com a biomassa das árvores por meio do Coeficiente de Correlação de Pearson. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando software estatístico R (R Core Team, 2023) e o pacote *ExpDes.pt.* (Ferreira *et al.*, 2021).

4.7 Ajuste das equações alométricas

Para permitir estimar a biomassa aérea e a biomassa total (incluindo raízes), foram avaliados seis modelos comumente utilizados em estudos florestais nacionais (Rezende *et al.*, 2006; Picard *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2019; Neres *et al.*, 2023). As equações foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados ordinários, empregando o diâmetro à altura do peito (D) e a altura total (H) das árvores como variáveis independentes (Tabela 1). Para avaliar a possibilidade de modelagem da biomassa através de relações matemáticas, foram estimadas as correlações lineares de Pearson entre as variáveis à 95% de probabilidade de acerto.

Tabela 1 - Modelos matemáticos avaliados para a estimativa da biomassa aérea e total de árvores de *Cenostigma macrophyllum* Tul.

	Modelo	Estrutura matemática
(1)	Schumacher – Hall (logarítmica)	$\text{Ln}(B) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(D) + \beta_2 \text{Ln}(H) + \text{Ln}(\varepsilon_i)$
(2)	Spurr (logarítmica)	$\text{Ln}(B) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(D^2H) + \text{Ln}(\varepsilon_i)$
(3)	Spurr	$B = \beta_0 + \beta_1 D^2H + \varepsilon_i$
(4)	Honner	$B = D^2 / (\beta_0 + \beta_1 (1/H)) + \varepsilon_i$
(5)	Ogaya	$B = D^2 (\beta_0 + \beta_1 H) + \varepsilon_i$
(6)	Takata	$B = D^2 \cdot H / (\beta_0 + \beta_1 D) + \varepsilon_i$

B = biomassa (kg arv⁻¹); H = altura total (m); D = diâmetro a 1,3 m do solo (cm); β_i = coeficientes da equação; Ln = logaritmo neperiano e ε_i = erro de estimativa associado ao modelo.

As estimativas dos modelos logaritimizadas foram recalculadas empregando o Fator de Meyer, conforme Sanquetta *et al.* (2015). Para seleção do melhor modelo ajustado, foram adotados três critérios estatísticos: coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro padrão da estimativa ($Syx\%$) e a análise gráfica dos resíduos.

Após a seleção das equações para cada variável de interesse, foi realizada a validação cruzada para as duas melhores estratégias de estimativa de biomassa. O método utilizado para avaliar a precisão da predição foi o Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV). A validação consistiu em utilizar os dados das 15 árvores, com uma árvore sendo utilizada como conjunto de teste e as 14 restantes como dados de treinamento para os modelos. Esse procedimento foi repetido até que cada árvore tivesse sido utilizada uma vez como conjunto de validação. A escolha da melhor estratégia foi baseada no menor valor da raiz do erro quadrático médio (RMSE) Equação 6, do erro médio absoluto (MAE) Equação 7 e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) Equação 8, conforme (Nazareno *et al.*, 2021; Nash; Sutcliffe, 1970).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{OBSi} - X_{MODELOi})^2}{n}} \quad (6)$$

em que: X_{OBSi} = valor observado (kg); $X_{MODELOi}$ = valor estimado pelo modelo (kg); n = número total de observações.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (7)$$

em que: valor observado (kg); P_i = valor estimado pelo modelo (kg); n = número total de observações.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^n (OBS_i - \overline{OBS})^2} \quad (8)$$

em que: OBS_i = valor observado (kg); SIM_i = valor estimado pelo modelo (kg); $\overline{OBS}$ = média dos valores observados (kg); n = número total de observações.

5 RESULTADOS

As características dendrométricas, assim como os estoques de biomassa para cada componente das árvores que foram mensuradas e pesadas para o ajuste dos modelos, estão detalhadas nas tabelas 2 e 3. Foi observada uma variação significativa na biomassa dos diferentes componentes das árvores. O diâmetro apresentou forte correlação com a biomassa seca ($r=0,97$) e com a altura ($r=0,72$) das árvores.

5.1 Estatísticas descritivas

Os resultados da estatística descritiva considerando as 15 árvores coletadas estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores mínimos, médios, máximos e desvio padrão (S) das variáveis dendrométricas de 15 árvores de *Cenostigma macrophyllum*.

Variável	Mínimo	Média	Máximo	S
D (cm)	7,75	16,37	26,90	6,25
H (m)	5,40	7,76	9,50	1,36
TU (%)	27,15	32,74	47,24	6,22
DBP _{FUSTE} (kg.m ⁻³)	661,14	745,26	807,88	44,71
DBP _{GALHO} (kg.m ⁻³)	597,14	692,00	782,69	59,99
DBP _{RAIZ} (kg.m ⁻³)	449,24	631,80	691,04	65,95
DBP _{TOTAL} (kg.m ⁻³)	569,17	689,69	756,93	50,44
V _{FUSTE} (m ³)	0,018	0,104	0,291	0,080
V _{GALHO} (m ³)	0,001	0,052	0,0153	0,050
V _{RAIZ} (m ³)	0,001	0,009	0,028	0,008
V _{TOTAL} (m ³)	0,021	0,165	0,473	0,132
B _{FUSTE} (kg)	7,98	52,00	132,58	39,11
B _{GALHO} (kg)	3,85	36,81	95,03	30,14
B _{FOLHA} (kg)	1,04	4,53	9,35	2,70
B _{RAIZ} (kg)	4,40	16,07	31,21	8,88
B _{ÁEREA} (kg)	12,87	93,34	236,01	70,01
B _{TOTAL} (kg)	17,27	109,40	267,17	78,38
FEB	1,44	1,79	2,64	0,32
R	0,12	0,22	0,39	0,09

D = diâmetro à altura do peito; H = altura total; TU = teor de umidade; DBP = densidade básica da madeira ponderada pelo volume; V = volume; B = biomassa; FEB = Fator de expansão de biomassa; R = razão entre biomassa subterrânea e aérea.

5.2 Partição da biomassa e carbono

A partição média da biomassa total das árvores analisadas foi de 47,5% no fuste, 22,7% nos galhos grossos, 10,9% nos galhos finos e 4,1% nas folhas, totalizando 85,2% da biomassa alocada na parte aérea. A biomassa abaixo do solo foi de 14,8%, com 13,0% alocados para as raízes grossas, 1,2% para raízes finas e 0,7% para raizada (Tabela 3). A distribuição dos estoques de carbono nos diferentes compartimentos seguiu um padrão semelhante ao da biomassa. A partição da biomassa entre os diferentes componentes arbóreos de *C. macrophyllum* seguiu a seguinte ordem: fuste > galhos grossos > raízes grossas > galhos finos > folhas > raízes finas > raizada.

Tabela 3 - Médias de biomassa seca total e carbono por compartimento de *Cenostigma macrophyllum*.

	Compartimento	Biomassa (kg arv ⁻¹)				B	C
		Média	S	Máximo	Mínimo	%	kg arv ⁻¹
Copa	Folha	4,5	2,7	9,3	1,0	4,1	2,3
	Galho fino ≤ (3 cm)	11,9	8,3	27,5	3,4	10,9	6,0
Fuste	Galho grosso ≥ (3 cm)	24,9	24,4	74,5	0,3	22,7	12,4
	Fuste Principal	52,0	39,1	132,6	8,0	47,5	26,0
Raiz	Raiz fina ≤ (3 cm)	1,8	0,8	3,1	1,1	1,7	0,9
	Raiz grossa ≥ (3 cm)	14,2	8,9	29,3	2,6	13,0	7,1
Total		109,4	78,4	267,2	17,3	100,0	54,8

Ao avaliar a média de biomassa total por classe de diâmetro, os valores variaram de 8,5 kg.arv⁻¹ na Classe I a 49,8 kg.arv⁻¹ na Classe III (Tabela 4). Esse incremento na biomassa de *C. macrophyllum* conforme o diâmetro aumenta evidencia que árvores maiores contribuem significativamente para o estoque de biomassa, o que tem implicações diretas no sequestro de carbono. O fuste é o compartimento que acumula a maior quantidade de biomassa em todas as classes diamétricas, com uma média de 52,0 kg.arv⁻¹, enquanto as folhas representam uma fração relativamente pequena em todas as classes, com valores variando de 1,9 kg.arv⁻¹ na classe I a 7,5 kg.arv⁻¹ na classe III. Os resultados indicaram um efeito significativo entre a biomassa

das árvores e as classes de diâmetro ($p < 0,005$ e $CV = 94,4\%$), bem como entre os diferentes compartimentos das árvores ($p < 0,001$ e $CV = 91,8\%$).

Tabela 4 - Valores médios da biomassa total de *Cenostigma macrophyllum* por classe de diâmetro e compartimento.

Classes de diâmetro		Biomassa (kg arv ⁻¹)				
		Folhas	Galhos	Fuste	Raiz	Total
I	5 - 12	1,9 ± 0,7	7,5 ± 3,9	16,2 ± 7,2	8,3 ± 3,5	8,5 b
II	13 - 20	4,1 ± 1,5	31,9 ± 14,9	44,3 ± 18,1	14,6 ± 6,1	23,7 b
III	≥ 21	7,5 ± 1,7	71,1 ± 19,3	95,5 ± 30,5	25,3 ± 6,5	49,8 a
Média		4,5 c	36,8 ab	52,0 a	16,1 bc	109,4
S		2,7	30,1	39,1	8,9	78,4

S = Desvio Padrão; Médias de letras iguais na mesma linha e coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

5.3 Densidade básica e teor de umidade da madeira

O valor médio da densidade básica foi de 702,6 kg m⁻³ e teor de umidade de 29,7% nos compartimentos analisados. A densidade básica do fuste diminuiu da base do fuste (816,2 kg m⁻³) para o topo (640,8 kg m⁻³), com média de 745,3 kg m⁻³. O teor de umidade da madeira foi inversamente proporcional a densidade básica (27,2%), sendo crescente da base (18,4%) para o topo (35,9%).

Ao analisar a densidade da madeira dos galhos grossos e das raízes grossas foi observado que a densidade decresceu ao longo das seções, com densidades mais altas nas posições de 25% para ambos os compartimentos (Tabela 5).

Os galhos grossos apresentaram densidades menores do que o fuste, com valor médio de 692,0 kg m⁻³ e teor de umidade médio de 31,3%. As raízes apresentaram as menores densidades básicas, com média de 631,8 kg m⁻³. O teor de umidade foi relativamente maior nas raízes (36,9%), indicando sua maior capacidade de retenção hídrica, essencial para a sobrevivência em condições de seca.

Tabela 5 - Média e desvio padrão da densidade básica e teor de umidade da madeira de *Cenostigma macrophyllum*.

	Seção	Densidade (Kg m ⁻³)	Teor de Umidade (%)
Fuste Principal	0%	816,2 ± 41,7	18,4 ± 4,2
	D	746,6 ± 55,2	25,3 ± 5,5
	25%	745,6 ± 44,9	25,4 ± 4,5
	50%	726,5 ± 51,7	27,4 ± 5,2
	75%	689,4 ± 64,3	31,1 ± 6,4
	100%	640,8 ± 94,8	35,9 ± 9,5
Galhos	Galhos grossos 25%	710,4 ± 57,3	29,0 ± 5,7
	Galhos grossos 75%	675,7 ± 69,4	32,4 ± 6,9
Raízes	Raízes grossas 25%	653,5 ± 79,1	34,7 ± 7,9
	Raízes grossas 75%	621,2 ± 56,4	37,9 ± 5,6
	Média	702,6 ± 61,5	29,7 ± 6,1

5.4 Equações alométricas

Para a seleção das melhores equações alométricas foi atribuída maior importância à distribuição gráfica dos resíduos (Figura 2), seguida pela significância dos parâmetros estimados pelo teste t ($p < 0,05$), menor erro padrão residual e maior R^2 ajustado (Tabela 6).

Considerando a estimativa da biomassa total, os resultados do Modelo 2 forneceram o maior coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj. = 0,973) e o menor erro percentual ($Syx = 11,67\%$). Na análise gráfica dos resíduos o Modelo 2 se destacou por apresentar uma distribuição residual mais equilibrada, com valores distribuídos uniformemente nas partes superior e inferior do gráfico, além de apresentar todos os parâmetros significativos. Na estimativa da biomassa aérea, os Modelos 2 e 6 obtiveram os melhores desempenhos, com uma pequena superioridade do Modelo 6, que obteve o menor erro residual ($Syx = 10,59\%$) e o maior coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj. = 0,980). No geral, os resíduos dos modelos avaliados não apresentaram tendências em super ou subestimar os dados de biomassas total (Figura 4) e biomassa aérea (Figura 5).

Tabela 6 - Coeficientes das equações alométricas desenvolvidas para estimar a biomassa de *Cenostigma macrophyllum*.

Modelo	Biomassa total						
	β_0	β_1	β_2	Fc	Syx (%)	Syx (kg)	R ² aj.
1	-1,8475	1,8568	0,5898	1,004	12,90	14,12	0,970
2	-2,1128	0,8718		1,003	11,67	12,77	0,973
3	11,0691 ^{ns}	0,0387			11,99	13,11	0,972
4	1,8647	7,3461			14,78	16,17	0,957
5	3,8773	-0,1334			14,43	15,79	0,959
6	15,3118	0,3978			11,88	13,00	0,972

Modelo	Biomassa aérea						
	β_0	β_1	β_2	Fc	Syx (%)	Syx (kg)	R ² aj.
1	-2,6320	1,9467	0,7589	1,003	11,81	11,02	0,977
2	-2,8000	0,9375		1,002	10,72	10,01	0,980
3	5,2138 ^{ns}	0,0346			10,93	10,20	0,979
4	1,1514	17,4283			12,09	11,28	0,974
5	5,9662	-0,3217			11,82	11,03	0,975
6	22,3507	0,2456			10,59	9,88	0,980

^{ns} = Parâmetro não significativo a 5% de significância.

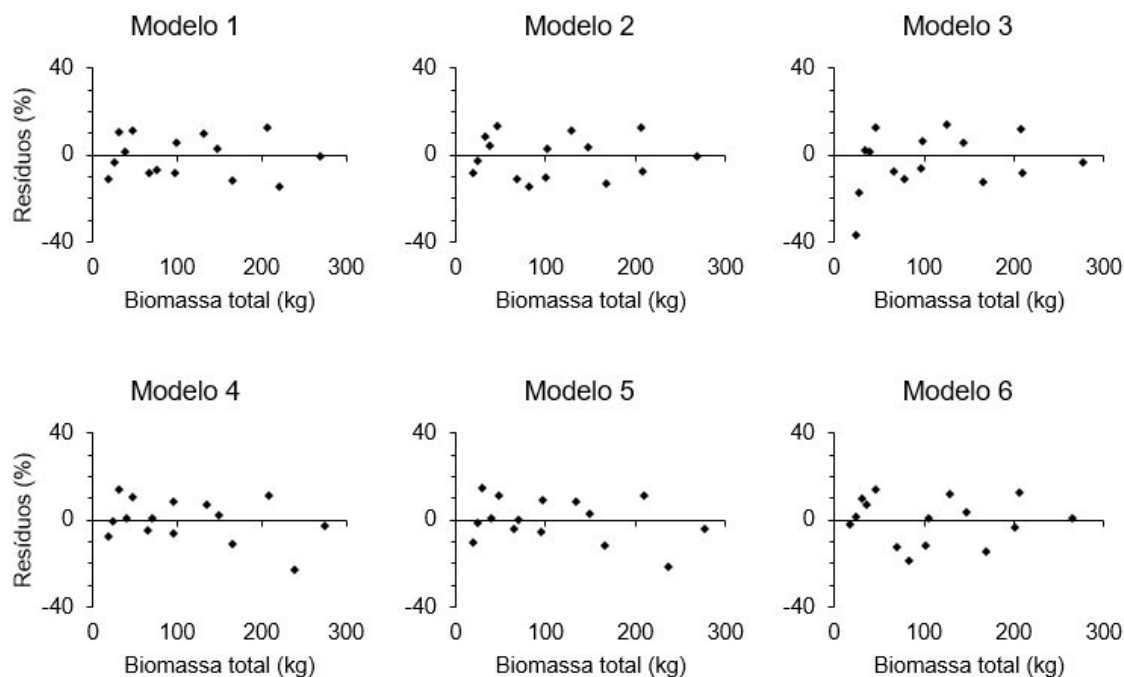


Figura 4 - Distribuição dos resíduos para os modelos ajustados para estimar a biomassa total das árvores.

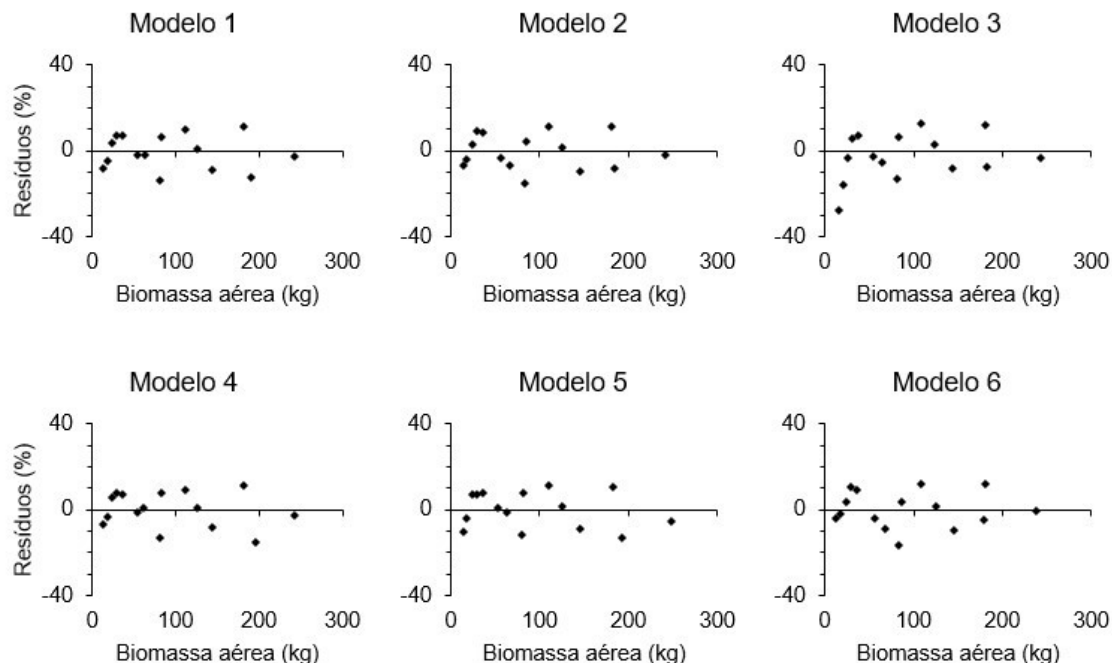


Figura 5 - Distribuição gráfica dos resíduos para os modelos ajustados para estimar a biomassa aérea das árvores.

As equações selecionadas para estimar a biomassa aérea e a biomassa total neste estudo foram provenientes do Modelo 6 (Takata) e do Modelo 2 (Spurr – Logarítmica). Embora o Modelo 2 tenha apresentado estatísticas de ajuste inferiores em relação ao Modelo 6, a distribuição dos resíduos não demonstrou tendência a subestimar a biomassa abaixo de 50 kg arv⁻¹ (Figuras 6 e 7).

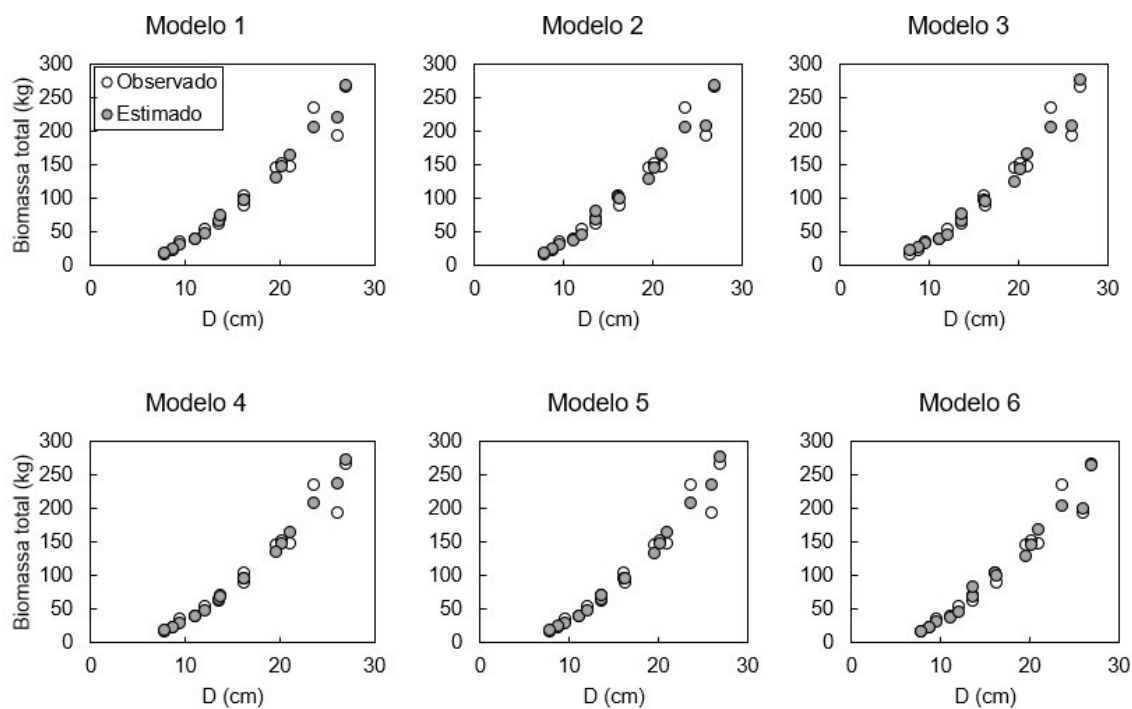


Figura 6 - Valores de biomassa total observados em relação aos valores de biomassa total estimados com as equações alométricas desenvolvidas.

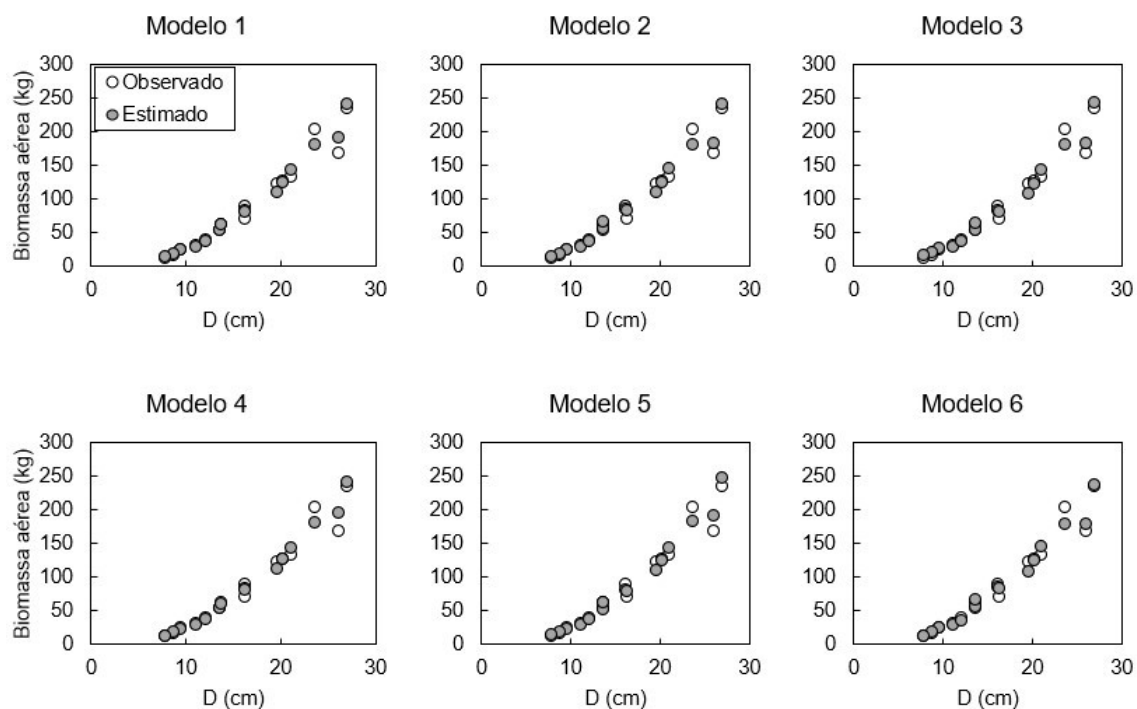


Figura 7 - Valores de biomassa aérea observados em relação aos valores de biomassa aérea estimados com as equações alométricas desenvolvidas.

A Tabela 7 apresenta os valores médios dos indicadores RMSE, MAE e NSE dos modelos testados para avaliar a precisão e eficiência da predição da biomassa de *Cenostigma macrophyllum* Tul.

Tabela 7 - Valores médios da raiz do erro quadrático médio (RMSE), do erro médio absoluto (MAE) e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) obtidos na validação cruzada de 15 vezes.

Biomassa total	RMSE	MAE	NSE
Modelo 1	12,399	8,761	0,976
Modelo 2	11,805	8,773	0,979
Modelo 3	12,101	9,519	0,977
Modelo 4	14,929	9,336	0,966
Modelo 5	14,567	9,466	0,967
Modelo 6	12,021	8,699	0,978
Biomassa aérea	RMSE	MAE	NSE
Modelo 1	9,705	6,699	0,982
Modelo 2	9,245	6,650	0,983
Modelo 3	9,402	7,024	0,983
Modelo 4	10,437	6,911	0,979
Modelo 5	10,207	7,283	0,980
Modelo 6	9,133	6,362	0,984

Para a biomassa total, o menor RMSE foi observado no Modelo 2 (11,805), indicando que ele teve o melhor desempenho na minimização dos erros quadráticos médios. O Modelo 4 obteve o maior RMSE (14,929), sugerindo que este modelo teve os maiores desvios nos valores preditos. O Modelo 6 teve o menor MAE (8,699), seguido pelo Modelo 2 (8,773). Enquanto o Modelo 3 apresentou os erros médios mais elevados (9,519). Todos os modelos obtiveram alto NSE, com valores variando entre 0,966 (Modelo 4) e 0,979 (Modelo 2). No geral, o Modelo 2 demonstrou um desempenho ligeiramente superior ao modelo 6, apresentando o menor RMSE e o maior NSE. Embora a diferença entre os dois modelos seja pequena, ambos são eficazes na estimativa da biomassa total.

Para a biomassa aérea, o Modelo 6 obteve o melhor desempenho, apresentando o menor RMSE (9,133) e o menor MAE (6,362), além do maior NSE (0,984), sugerindo maior precisão e eficiência. Por outro lado, o Modelo 4 obteve o

pior desempenho, com o maior RMSE (10,437) e um MAE relativamente alto (6,911). O Modelo 5 apresentou o maior MAE (7,283), mas ainda manteve um bom nível de eficiência (0,980). No geral, todos os modelos tiveram NSE elevados, indicando boa capacidade preditiva, mas o Modelo 6 foi o mais preciso para estimar a biomassa aérea. O Modelo 4 teve o pior desempenho em RMSE e NSE, sugerindo que ele teve mais dificuldades em prever corretamente a biomassa aérea.

6 DISCUSSÃO

6.1 Partição da biomassa

Com diâmetros variando entre 7,8 cm e 26,9 cm e alturas entre 5,4 m e 9,5 m, a heterogeneidade dessas medidas reflete a adaptabilidade fenotípica de *C. macrophyllum* a diferentes condições edafoclimáticas. Essa plasticidade pode ser uma vantagem adaptativa em ambientes onde a vegetação original foi desmatada para a produção de lenha ou implantação de sistemas agrícolas, permitindo que a espécie mantenha um crescimento vantajoso sob diversas pressões ambientais.

A relação entre a biomassa acima e abaixo do solo, no entanto, varia dependendo da densidade e do estágio de regeneração da vegetação (Costa *et al.*, 2014). Neste estudo, a maior fração da biomassa foi alocada na parte aérea das árvores (85,2%), com maior contribuição do fuste (47,5%), seguido pelos galhos grossos (22,7%), enquanto as raízes foram responsáveis por 14,7% da biomassa total (Tabela 3).

A significativa participação do fuste e dos galhos na alocação da biomassa pode ser explicada pela habilidade desses órgãos em armazenar a maior fração do carbono fixado, desempenhando a função de suporte estrutural da árvore e da copa (Silva *et al.*, 2022). O fuste, em particular, é o componente mais representativo no armazenamento de carbono, pois constitui o principal reservatório da planta (Kuzyarov; Domanski, 2000; Virgens *et al.*, 2017). Isso o torna crucial para mitigar as mudanças climáticas e um alvo importante em estratégias de conservação e manejo florestal, contribuindo significativamente para o sequestro de carbono atmosférico em florestas tropicais secas.

A baixa contribuição das folhas (4,1%) para a biomassa total pode ser explicada pelo comportamento caducifólio da espécie, típica da região da Caatinga, onde as árvores perdem suas folhas durante a estação seca como um mecanismo natural para evitar a perda de água pela transpiração (Alves, 2011). No entanto, nenhuma das árvores amostradas indica que estava perdendo folhas no momento da coleta de dados. Além disso, as folhas dessa espécie são relativamente pequenas, o que naturalmente reduz sua contribuição para a biomassa total.

Em relação aos valores de biomassa radicular, houve similaridade com valores reportados por Costa *et al.* (2014) em área com diferentes estágios de regeneração florestal e tipos de vegetação densa e aberta na Caatinga do nordeste do Brasil. Eles demonstraram que a maior parte da biomassa radicular está concentrada nos primeiros 40 cm do solo, com predominância de raízes grossas. Além disso, a biomassa das raízes foi significativamente maior em áreas com mais de 60 anos de regeneração em comparação com áreas mais jovens de 18 e 40 anos, com a razão de raízes (R) variando de 0,67 nas áreas mais antigas a 0,32 e 0,27 nas áreas em regeneração mais recente.

Para *C. macrophyllum*, a razão de raízes média (R) foi de 0,22, indicando uma menor alocação de biomassa para as raízes, possivelmente devido a um período de regeneração mais curto ou às condições edáficas específicas da área de estudo. De acordo com Costa *et al.* (2014), a biomassa radicular se acumula mais lentamente que a biomassa aérea, levando décadas para se estabilizar em solos rasos, e a razão de raízes (R) foi maior que a observada em outras florestas tropicais secas devido à baixa disponibilidade hídrica na Caatinga.

A quantificação precisa da biomassa nas raízes é crucial para entender o papel complexo desta espécie no ciclo do carbono do solo, contribuindo tanto para a retenção de carbono quanto para o sequestro de carbono a longo prazo. O fator de expansão de biomassa médio (FEB) observado neste estudo (1,44) foi próximo ao reportado por Virgens *et al.* (2017) para espécies em área de Caatinga arbórea (1,74). O cálculo do Fator de Expansão da Biomassa (FEB), resultante da relação entre biomassa total e biomassa do fuste, possibilita a conversão de estimativas de volume em biomassa florestal. Com base nos valores do FEB é possível modelar estimativas de quantidade de biomassa para diferentes espécies florestais (Virgens *et al.*, 2017). Essas variáveis são frequentemente integradas em modelos alométricos para uma estimativa mais precisa da biomassa total, permitindo um entendimento mais aprofundado da dinâmica florestal e da distribuição de carbono no ecossistema (Silva *et al.*, 2008).

Embora galhos finos (10,9%) e raízes finas (1,2%) representem uma fração relativamente pequena da biomassa total, esses compartimentos desempenham um papel fundamental na ciclagem de nutrientes e na interação entre a biomassa aérea e o solo, contribuindo significativamente para a dinâmica do carbono no solo.

Subestimar esses componentes pode levar a imprecisões na quantificação dos estoques totais de carbono e, conseqüentemente, comprometer o planejamento de estratégias para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE), principais causadores do aquecimento global. Essa subestimação afeta a avaliação da contribuição total da vegetação para o sequestro de carbono, tornando mais difícil o alcance de metas de conservação e a implementação de estratégias eficazes contra as mudanças climáticas.

O padrão de alocação de biomassa em espécies que ocorrem na Caatinga geralmente segue a ordem: fuste > galhos > folhas. No entanto, alguns estudos demonstram a ordem como galhos > fuste > folhas. Diversos fatores podem influenciar essa variação, sendo os mais comuns no ambiente, o estágio de sucessão, a precipitação e a distribuição espacial dos indivíduos (Lima Junior *et al.*, 2014; Farias *et al.*, 2016; Silva *et al.* 2022). Estes resultados são corroborados por estudos realizados por Virgens *et al.* (2017), que reportam uma maior contribuição do fuste (73,9%), seguido pelos galhos com 25,5% e folhas contribuindo com apenas 0,53% da biomassa total. Silva *et al.* (2022) apresentaram resultados semelhantes, com 59,6% da biomassa alocada ao fuste, 35,4% aos galhos e 4,85% às folhas. Em contraste, estudos de Drumond *et al.* (2008) indicou uma ordem de distribuição de biomassa de folhas < casca < galhos < raízes < fuste. Em Alves (2011) metade da biomassa acima do solo era composta por galhos (46,9%), seguidos pela fração do fuste (39,4%), com folhas do estrato arbustivo contribuindo menos para a formação da biomassa total (13,7%).

A biomassa média total de *C. macrophyllum* variou consideravelmente entre as classes de diâmetro, com um aumento progressivo em todos os compartimentos conforme o diâmetro das árvores aumentava. Nas árvores de maior porte (classe III), a biomassa total atingiu 49,8 kg por árvore, enquanto na classe I foi de apenas 8,5 kg (Tabela 4). O estudo do comportamento da biomassa nas diferentes classes diamétricas permite identificar como o potencial de crescimento e o armazenamento de carbono se alteram com o desenvolvimento da planta.

O incremento na biomassa conforme o diâmetro aumenta destaca a importância do tamanho da árvore na alocação de biomassa e no estoque de carbono. Os altos coeficientes de variação e desvios-padrão observados neste estudo, sugerem uma variabilidade significativa nos dados, reforçando a influência dos fatores

ambientais e das práticas de manejo florestal na biomassa. A classe III, com médias significativamente maiores, demonstra o potencial do manejo de florestas maduras para maximizar o sequestro de carbono. Além disso, uma análise dinâmica dessas classes ao longo do tempo pode fornecer insights sobre regimes de distúrbios, sucessão ecológica e capacidade reprodutiva das espécies. Esse incremento pode ser observado em outros estudos de vegetação tropical seca, onde tanto a biomassa de raízes quanto a aérea aumentam com o tempo de regeneração e a densidade da vegetação (Costa *et al.*, 2014).

O compartimento do fuste foi o maior reservatório de biomassa e, consequentemente, de carbono, enquanto as raízes e folhas possuíram a menor contribuição (Tabela 3). Essa distribuição desigual sugere que usar um fator fixo de carbono não reflete com precisão a heterogeneidade do carbono armazenado nos compartimentos das árvores. Aplicar um valor fixo para o conteúdo de carbono (50% da biomassa) pode levar a superestimações ou subestimações nos cálculos de estoque de carbono, refletindo as variações nos componentes de carbono entre diferentes espécies e partes das árvores. Estimativas precisas de biomassa e carbono são essenciais para quantificar o papel das florestas e da vegetação remanescente na mitigação das mudanças climáticas.

6.2 Densidade básica e teor de umidade da madeira

Neste estudo, encontramos valor médio de densidade básica da madeira de 689,7 kg.m⁻³. Esse valor está de acordo com outros estudos realizados na região, por exemplo, Santos *et al.* (2013) relataram uma densidade básica média da madeira de 708,8 kg.m⁻³ para oito espécies de árvores de uma floresta de caatinga, com espécies atingindo até 970 kg.m⁻³. O alto valor da densidade básica da madeira encontrado em nossa espécie estudada é esperado, uma vez que as condições climáticas da região, caracterizadas por altas temperaturas médias anuais e baixa umidade do solo, são fatores primordiais no aumento dos valores globais de densidade da madeira (Mo *et al.*, 2024).

A densidade básica da madeira é uma variável importante para permitir a estimativa da biomassa a partir de valores de volume de madeira, os quais são comumente utilizados em práticas de estimativa de inventário florestal (Nazareno *et*

al. 2021). Outras variáveis importantes fornecidas neste estudo são o Fator de Expansão da Biomassa e a Razão de Raízes, que neste estudo foram estimadas em 1,79 e 0,22, respectivamente (Tabela 2). Assim, uma árvore estimada para produzir 1 m³ de madeira do fuste, usando um modelo de volume, produzirá 689,7 kg de biomassa do fuste, podendo ser expandida para 1.234,6 kg de volume aéreo total e 1.506,2 kg de biomassa total (incluindo raízes).

O volume médio de madeira encontrado nos compartimentos lenhosos, utilizando a metodologia de Huber, foi de 0,104 m³ para o fuste e 0,052 m³ para os galhos grossos. No entanto, ao estimar o volume com base no peso seco das árvores, observou-se uma redução nos valores, com o volume do fuste sendo 0,068 m³ e o dos galhos 0,034 m³. Este comportamento pode ser atribuído ao formato irregular do fuste da espécie *C. macrophyllum*, que apresenta caneluras longitudinais profundas e não se assemelha a um cilindro perfeito. Além disso, a irregularidade na forma dos galhos também contribui para essa diminuição do volume.

Outro fator relevante foi a variação no teor de umidade entre os compartimentos das árvores, que variou cerca de 18,4% na base do fuste até 37,9% nas raízes (Tabela 5). Essa variação ao longo da árvore reflete a adaptação fisiológica da espécie ao clima árido da Caatinga. Compartimentos de transporte e suporte, como o fuste, tendem a ter menor teor de umidade e madeira mais densa para garantir estabilidade mecânica necessária para sustentar o peso da árvore. Por outro lado, compartimentos menores e mais expostos, como galhos e folhas, retêm maior quantidade de água para auxiliar na fotossíntese e na regulação térmica da planta.

Batista *et al.* (2020) ao avaliar as características dendrométricas, químicas e físicas da madeira, com ênfase na densidade básica e teor de umidade ao longo do eixo longitudinal (base-topo) de diferentes espécies florestais da Caatinga, observou que todas as espécies apresentaram o mesmo padrão de variação longitudinal, com densidade básica maior na base e menor no topo, enquanto o teor de umidade apresentou comportamento inverso à densidade básica, sendo maior no topo e menor na base do fuste. Conforme estes mesmos autores, a madeira das espécies estudadas foi considerada adequada para a produção de lenha, carvão, mourões e madeira serrada. Algumas espécies demonstraram características superiores para fins energéticos e industriais, principalmente devido à alta densidade e durabilidade.

De acordo com a literatura, madeiras que apresentam valores de densidade abaixo de 550 kg.m^{-3} são classificadas de baixa densidade, as que apresentam densidade entre 550 kg.m^{-3} a 720 kg.m^{-3} são classificadas de média densidade e madeiras com valores superiores a 730 kg.m^{-3} são classificadas como madeiras pesadas ou de alta densidade (Melo *et al.*, 1990; Silva; Vale; Milguel, 2015). A madeira de *C. macrophyllum* pode ser classificada como de média a alta densidade, dependendo da seção da árvore avaliada.

6.3 Equações alométricas

Equações alométricas são ferramentas essenciais para predição de biomassa e monitoramento do crescimento florestal. Ajustes precisos são especialmente importantes quando se consideram questões ambientais globais, como desmatamento e impacto das mudanças climáticas. Melhorias na modelagem por meio do refinamento de parâmetros estatísticos podem aumentar a precisão dos resultados, tornando-os aplicáveis em vários contextos florestais.

Os modelos ajustados neste estudo foram satisfatórios, de forma geral, principalmente tratando-se de uma espécie com poucos trabalhos relatados na literatura nacional sobre estimativa de biomassa. As equações de estimativa de biomassa desenvolvidas (Tabela 6) podem ser empregadas em pesquisas futuras sobre quantificação de biomassa e carbono por meio de métodos não destrutivos. Essas informações também apoiarão estudos de monitoramento e dinâmica de carbono na vegetação de Caatinga da região, tornando tais estudos mais acessíveis e econômicos.

As estatísticas de ajuste obtidas neste estudo demonstraram um melhor desempenho em comparação às equações utilizadas para estimar biomassa em fragmentos de Caatinga (Lima Júnior *et al.*, 2014) e Cerrado (Miguel, 2014) (Figura 8).

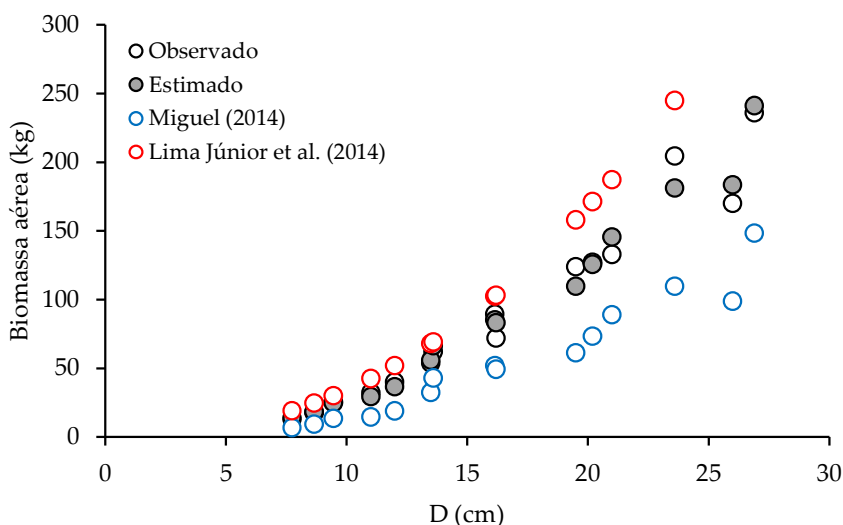


Figura 8 - Comparação dos valores observados e estimados para a biomassa acima do solo utilizando a equação desenvolvida neste estudo (Modelo 2), juntamente com equações desenvolvidas anteriormente por Lima Júnior (2014) e Miguel (2014).

Erros nas estimativas de biomassa podem subestimar ou superestimar o estoque de carbono armazenado, levando a políticas inadequadas de gestão ambiental e programas de crédito de carbono. Um exemplo disso é a dificuldade em capturar a contribuição de componentes como galhos finos e raízes finas. Apesar de constituírem uma parcela reduzida da biomassa total, esses compartimentos exercem funções essenciais no ciclo de nutrientes e na dinâmica do carbono no solo, atuando como elo de interação entre a superfície e o ambiente subterrâneo.

Equações que consideram as características específicas de cada componente da planta, como o fuste, galhos grossos, galhos finos e raízes grossas e finas, são essenciais para garantir que os cálculos de biomassa reflitam com precisão a verdadeira contribuição dessas plantas para o ciclo do carbono. Nesse sentido, ajustar equações para integrar essas variáveis melhora a precisão dos dados e fortalece a base científica para o uso sustentável da vegetação em programas de mitigação das mudanças climáticas.

Neres *et al.* (2023) destacaram a importância de minimizar erros em estimativas de biomassa e carbono, enfatizando a necessidade de ajustar rigorosamente modelos de quantificação à base de dados locais para garantir resultados válidos e confiáveis. A variabilidade edafoclimática entre regiões pode influenciar significativamente o

conteúdo de biomassa e carbono, ressaltando que modelos ajustados especificamente para a área de estudo são essenciais para evitar subestimação ou superestimação do sequestro de carbono. Neste contexto, Sampaio e Silva (2005) mencionam que gerar uma equação específica para cada espécie é uma tarefa tremenda, e aplicar todas essas equações em amplos levantamentos requer tempo e esforço substanciais. Portanto, a maioria dos autores visa desenvolver equações gerais que sejam válidas para tipos de vegetação que cobrem grandes áreas.

O alto coeficiente de determinação ajustado encontrado em nossa equação (0,97) indica que ela pode ser eficaz na estimativa da biomassa da caatinga. Neres *et al.* (2023) citam que a precisão dos inventários florestais é crucial tanto para avaliações ambientais quanto econômicas, sendo que modelos com coeficientes de determinação ajustados (R^2 ajustado) acima de 0,90 são preferíveis para garantir estimativas mais confiáveis nos resultados.

Na região do MATOPIBA, a expansão agrícola reduziu significativamente a cobertura vegetal nativa, afetando diretamente a capacidade de sequestro de carbono dessas áreas. O Cerrado e a Caatinga estão entre os biomas mais vulneráveis a essa expansão, e a *C. macrophyllum*, uma espécie adaptada às condições de estresse hídrico, pode servir como modelo de resiliência ecológica e potencial mitigadora das mudanças climáticas.

Segundo Ribeiro *et al.* (2021), esta espécie é adequada para uso em programas de restauração florestal na região sul do Piauí devido à sua alta taxa de sobrevivência e crescimento vigoroso tanto em condições de viveiro quanto de campo. No entanto, o estudo enfatiza a importância de pesquisas futuras para avaliar o comportamento de campo a longo prazo de *C. macrophyllum* sob diferentes regimes silviculturais. A vegetação remanescente nessas regiões desempenha um papel estratégico na retenção de carbono, e medições precisas de biomassa podem fundamentar ações de conservação e recuperação ambiental, bem como auxiliar na implementação de iniciativas voltadas à redução de emissões por desmatamento e degradação florestal (REDD+).

Informações sobre biomassa e estoque de carbono podem dar suporte a planos de manejo que equilibrem exploração e conservação, promovendo práticas sustentáveis. A adoção de práticas baseadas em modelagem preditiva pode aumentar

a resiliência da floresta às mudanças climáticas, ao mesmo tempo em que apoia comunidades locais que dependem de produtos florestais.

Os resultados deste estudo têm implicações significativas para programas de restauração florestal. Devido à sua adaptabilidade e alocação eficiente de biomassa, *C. macrophyllum* pode ser uma escolha estratégica para replantio em áreas degradadas. Compreender a dinâmica de alocação da biomassa possibilita a adoção de práticas de manejo voltadas à recuperação do solo e ao fortalecimento da biodiversidade. Ademais, a seleção de espécies nativas é fundamental para assegurar a resiliência dos ecossistemas em projetos de restauração, sobretudo em ambientes de florestas tropicais secas.

7 CONCLUSÕES

As equações alométricas advindas do ajuste do modelo de Spurr logaritimizado apresentaram estatísticas satisfatórias para estimativa da biomassa total e da biomassa aérea de árvores de *Cenostigma macrophyllum*. As equações selecionadas para estimativa da biomassa foram provenientes dos modelos de Takata: $Ba = D^2 \cdot H / (22,3507 + 0,2456 \cdot D) + \varepsilon_i$ e de Spurr logaritimizado: $\ln(Bt) = -2,1128 + 0,8718 \cdot \ln(D^2H) + \ln(\varepsilon_i)$,

As árvores com diâmetros acima de 20,2 cm (Classe III) concentraram os maiores estoques de biomassa. A biomassa apresentou variação de 17,3 a 267,2 kg, com média de 109,4 kg por árvore. Aproximadamente 47,5% dos estoques totais de biomassa seca e carbono estão alocados no fuste das árvores e 37,8% na copa. Os galhos contribuem com 33,6% da biomassa total, seguido pelas raízes, que representam 14,7% e pelas folhas, que somam cerca de 4,1% da biomassa total.

A densidade básica média da madeira de *C. macrophyllum* foi de 689,7 kg.m⁻³ e o teor de umidade médio da madeira foi de 32,74%. A densidade básica do fuste foi de 745,3 kg.m⁻³, dos galhos de 692 kg.m⁻³ e das raízes de 631,8 kg.m⁻³.

O valor médio do fator de expansão da biomassa encontrado para o caneleiro foi de 1,79 e a razão de raízes 0,22.

Os resultados obtidos a partir da análise de cinco indivíduos por classe diamétrica devem ser considerados como um indicativo para futuras pesquisas as quais devem incluir amostragens mais abrangentes e representativas.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, B. A. S.; SOARES, E. S. S.; MASRUA, M. L. A.; OLIVEIRA, M. C. P.; LOPES, A. V. F.; SOUSA, G. M. Biologia floral e reprodutiva de *Cenostigma macrophyllum* Tul. (Fabaceae) no Parque Zoobotânico de Teresina, Piauí. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, p. 84-95, 2016.
- AGUIAR, R. B.; GOMES, J. R. C. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, Estado do Piauí: Diagnóstico do Município de Picos**. CPRM, 2004.
- ALEMDAG, I. S. **Manual of data collection and processing for the development of forest biomass relationships**. Ottawa: Minister of Supply and Services Canada, 1980. 38 p.
- ALMEIDA, S. P.; SILVA, R. C.; SOUZA, M. J. Uso medicinal e biológico de espécies de Fabaceae. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 34, p. 45-57, 2019.
- ALVES, A. R. **Quantificação de biomassa e ciclagem de nutrientes em áreas de vegetação de Caatinga no município de Floresta, Pernambuco**. 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.
- ALVES, C. Q.; DAVID, J. M.; DAVID, J. D.; VILLAREAL, C. F.; SOARES, M. B. P.; QUEIROZ, L. P.; AGUIAR, R. M. Flavonoids and other bioactive phenolics isolated from *Cenostigma macrophyllum* (Leguminosae). **Química Nova**, v. 35, n. 6, p. 1137-1140, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11.941**: densidade básica da madeira. Disponível em: <https://abnt.org.br/>. Acesso em: 1 out. 2024.
- AZANI, N.; BABINEAU, M.; BAILEY, C. D.; BANKS, H.; BARBOSA, A. R.; PINTO, R. B.; BOATWRIGHT, J. S.; BORGES, L. M.; BROWN, G. K.; ... ZHANG, W. A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny: The Legume Phylogeny Working Group (LPWG). **Taxon**, v. 66, p. 44-77, 2017.
- BASTOS, A.; SANQUETTA, C. R.; MANIESI, V.; SANQUETTA, M. N. I.; PINHEIRO, U.; SANTOS, A.; CORTE, A. P. D.; ROSÁRIO, P. H. K. Quantificação de estoques de carbono em plantios florestais mistos implantados com apoio do Projeto Viveiro Cidadão. In: **TERRA & MATA**, 2019. p. 93-111.
- BATISTA, F. G.; MELO, R. R.; MEDEIROS, D. T.; OLIVEIRA, A. G. S.; FREITAS, C. B. A.; SILVA, E. D. G.; PIMENTA, A. S. Variação longitudinal na qualidade da madeira de cinco espécies florestais da Caatinga. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. 1-9, 2020.
- BEHERA, S. K.; SAHU, N.; MISHRA, A. K.; BARGALI, S. S.; BEHERA, M. D.; TULI, R. Aboveground biomass and carbon stock assessment in Indian tropical deciduous forest and relationship with stand structural attributes. **Ecological Engineering**, v. 99, p. 513-524, 2017.

BEHLING, A.; SANQUETTA, C. R.; CARON, B. O.; SCHIMIDT, D.; ELLI, E. F.; CORTE, A. P. D. Teores de carbono orgânico de três espécies arbóreas em diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, p. 13-19, 2014.

BERT, D.; DANJON, F. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Aait.). **Forest Ecology and Management**, v. 222, p. 279-295, 2006.

BIRD, D. N. **Review of existing methods for carbon accounting**. CIFOR, 2010. 54 p.

CALDEIRA, M. V. W. **Determinação de biomassa e nutrientes em uma floresta ombrófila mista montana em General Carneiro, Paraná**. 2003. 176 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

CASTRO, N.; MATA-SUCRE, Y.; CARVALHO-SOBRINHO, J.; MARQUES, A.; QUEIROZ, R. T.; SOUZA, G. Genomic stability in *Cenostigma* Tul., (Caesalpinioideae, Fabaceae): causes and consequences. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 204, p. 137-151, 2024.

CHANG, M. Y. **Sequestro de carbono no Brasil - Dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. 2004. 276 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

COSTA, T. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALES, M. F.; ACCIOLY, L. J. O.; ALTHOFF, T. D.; PAREYN, F. G. C.; ALBUQUERQUE, E. R. G. M.; MENEZES, R. S. C. Root and shoot biomasses in the tropical dry forest of semi-arid northeast Brazil. **Plant and Soil**, v. 378, p. 113-123, 2014.

DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. **Floresta e Ambiente**, v. 18, p. 410-416, 2011.

DRUMOND, M. A.; PIRES, I. E.; OLIVEIRA, V. R.; OLIVEIRA, A. R.; ALVAREZ, I. A. Produção e distribuição de biomassa de espécies arbóreas no Semiárido brasileiro. **Revista Árvore**, v. 32, p. 665-669, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Bioma Cerrado Biodiversidade**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-cerrado/biodiversidade>. Acesso em: 2 out. 2024.

FARIAS, S. G. G.; RODAL, M. J. N.; MELO, A. L.; SILVA, M. A. M.; LIMA, A. L. A. Fisionomia e estrutura de vegetação de Caatinga em diferentes ambientes em Serra Talhada - Pernambuco. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 435-448, 2016.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **Package 'ExpDes.pt'**. R package version 1.2.2, 2021.

HIGUCHI, N.; CARVALHO, A. J. R. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: SEMINÁRIO DE EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO₂: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1994. p. 125-145.

HOUGHTON, R. A. The worldwide extent of land-use change. **Bioscience**, v. 44, n. 5, p. 305-313, 1994.

HUSCH, B.; BEERS, T.; KERSHAW JR, J. **Forest Mensuration**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 443 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual**, 2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 27 set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **[Biomass brasileiros]**. [2024]. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/18307-biomass-brasileiros.html>. Acesso em: 2 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **[Cobertura natural dos biomas do país de 2000 a 2018]**. [2020]. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/28944-ibge-retrata-cobertura-natural-dos-biomas-do-pais-de-2000-a-2018>. Acesso em: 27 set. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020**. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for national greenhouse gas inventories: agriculture, forestry and other land use**. 2024. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 1 out. 2024.

KAUFFMAN, J. B.; HUGHES, R. F.; HEIDER, C. Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agricultural abandonment in the Neotropics. **Ecological Applications**, v. 19, p. 1211-1222, 2009.

KEITH, H.; LINDENMAYER, D. B.; MACKEY, B. G.; BLAIR, D.; CARTER, L.; McBURNEY, L.; OKADA, S.; KONISHI-NAGANO, T. Accounting for biomass carbon stock change due to wildfire in temperate forest landscapes in Australia. **PLoS One**, v. 9, e107126, 2014.

KOCH, A.; KAPLAN, J. O. Tropical forest restoration under future climate change. **Nature Climate Change**, v. 12, p. 279-283, 2022.

KUPPER, A. P. F. **Biomassa dos diferentes compartimentos de árvores de eucalipto sob manejo da talhadia e alto fuste**. 2023. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2023.

KUZYAKOV, Y.; DOMANSKI, G. Carbon input by plants into the soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 163, p. 421-431, 2000.

LEWIS, G.; SCHRIRE, B.; MACKINDER, B.; LOCK, M. **Legumes of the world**. Londres: Royal Botanic Gardens, 2005. 35 p.

LIMA JÚNIOR, C.; ACCIOLY, L. J. O.; GIONGO, V.; LIMA, R. L. F. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C. **Estimativa de biomassa lenhosa da Caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação**. 2014.

LIMA, M. C. D.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; SANQUETTA, C. R.; NOVAES, A. B.; MELO, L. C. Biomass and carbon stock from *Pinus caribaea* var. *hondurensis* under homogeneous stands in Southwest Bahia, Brazil. **Ciência Rural**, v. 46, p. 957-962, 2016.

LINDNER, M.; KARJALAINEN, T. Carbon inventory methods and carbon mitigation potentials of forests in Europe: a short review of recent progress. **European Journal of Forest Research**, v. 126, p. 149-156, 2007.

LIRA, S. R. S. **Estudo farmacológico dos efeitos gastrointestinais e comportamentais do lupeol e da dilactona do ácido valônico, isolados de Cenostigma macrophyllum Tul., em roedores**. 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

LITTON, C.; RAICH, J. W.; RYAN, M. G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, v. 13, n. 10, p. 2089-2109, 2007.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil**. v. 2, 2. ed. Nova Odessa: Editora Plantarum, 1998. 261 p.

LUSTOSA, B. M. **Alocação de recursos e razão raiz: parte aérea em duas espécies arbóreas de uma floresta sazonal seca**. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

MACHADO, R. R. B.; MEUNIER, I. M. J.; SILVA, J. A. A. Árvores nativas para a arborização de Teresina, Piauí. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 1, n. 1, 2006.

MARCOS, D. P.; FRIEDRICH, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D. Compartimentação do estoque individual de carbono em uma plantação comercial de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.- Hil.). **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 2, p. 168-173, 2020.²

MELO, J. E.; CORADIN, V. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão: [s.n.], 1990. v. 3. p. 695-705.

MIGUEL, E. P. **Caracterização da flora e da produção em volume, biomassa e carbono da vegetação arbórea em área de cerrado no estado do Tocantins**. 2014. 200 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caatinga**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biomas/caatinga.html>. Acesso em: 2 out. 2024.

MIRANDA, D. L. C. **Modelos matemáticos de estoque de biomassa e carbono em áreas de restauração florestal no sudoeste paulista**. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MO, L.; CROWTHER, T. W.; MAYNARD, D. S.; VAN DEN HOOGEN, J.; MA, H.; BIALIC-MURPHY, L.; LIANG, J.; DE-MIGUEL, S.; NABUURS, G.-J.; REICH, P. B.; ... ZIMMERMAN, M. The global distribution and drivers of wood density and their impact on forest carbon stocks. **Nature Ecology & Evolution**, 2024.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, Part I - a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NAZARENO, L. S. Q.; RIBEIRO, A.; SOUSA, M. V. C.; VIEIRA, C. W.; FERRAZ FILHO, A. C. Wood volume estimation strategies for trees from a dry forest/savannah transition area in Piauí, Brazil. **Southern Forests: A Journal of Forest Science**, v. 83, p. 111-119, 2021.

NERES, N. G. C.; A., S. P.; G., A. M. V.; B., C. M. C.; A., P. M.; F., S. A. Estimation of biomass, carbon and CO₂ of *Khaya senegalensis* (DESR.) A. Juss. **Journal of Engineering Research**, v. 3, p. 1-15, 2023.

NIKLAS, K. J. **Plant allometry: the scaling of form and process**. Chicago: The University of Chicago Press, 1994. 395 p.

NOGUEIRA, M. F. M. **Biomassa Energética: Caracterização da Biomassa**. Palestra Proferida na I Escola de Combustão, Florianópolis, SC, 2007.

ORELLANA, B. B. M. A. **Quantificação da biomassa e potencial energético de Tachigali vulgaris em áreas plantadas no estado do Amapá**. 2015. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília, DF, 2015.

PICARD, N.; HENRY, M.; MORTIER, F.; TROTTA, C.; SAINT-ANDRÉ, L. Using Bayesian model averaging to predict tree aboveground biomass in tropical moist forests. **Forest Science**, v. 58, p. 15-23, 2012.

QUEIROZ, L. P.; FREIRE, C. D. Caatinga. In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (Ed.). **Caatinga: Ecology and Biodiversity**. Cham: Springer International Publishing, 2017.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, 2023.

RATUCHNE, L. C.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHAMNE, P. A. Estado da arte na quantificação de biomassa em raízes de formações florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 23, p. 450-462, 2016.

REZENDE, A. V.; VALE, A. T.; SANQUETTA, C. R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; FELFILI, J. M. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília, DF. **Scientia Forestalis**, v. 71, p. 65-73, 2006.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; FARIAS, S. G. G.; DIAS, B. A. S.; SILVA, H. P. Restoration potential of eight tree species from a seasonally dry tropical forest in Southeast Piauí, Brazil. **Cerne**, v. 27, 2021.

ROCHADELLI, R. **A estrutura de fixação dos átomos de carbono em reflorestamento (Estudo de caso: Mimosa scabrella Benthams, Bracatinga)**. 2001. 86 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SALAMI, G.; FERREIRA, R. L. C.; FREIRE, F. J.; SILVA, J. A. A.; PESSOA, M. M. L.; SILVA, A. F. Biomass and carbon balance in a dry tropical forest area in Northeast Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 95, 2023.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SILVA, G. C. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 4, p. 935-943, 2005.

SANQUETTA, C. R. **Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal**. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 1996. 49 p. (Série Didática, n. 8).

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B.; GOMES, F. dos S. (Ed.). As florestas e o carbono. Curitiba: Ed. dos Autores, 2002. p. 119-140.

SANQUETTA, C. R.; COSTA JUNIOR, S.; SANQUETTA, M. N. I.; CORTE, A. P. D.; PEDROSA-MACEDO, J. H. Partição da biomassa e relações biométricas de aroeira-pimenteira. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 4, p. 104, 2019.

SANQUETTA, M.; SANQUETTA, C. R.; DURIGAN, A.; CORTE, A. P.; COUTINHO, V. Equações de biomassa para aroeira-pimenteira (*Schinus terebinthifolius* RADDI). **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, 2015.

SANTOS, F. J. B. **Constituintes químicos da fase hidroalcoólica e atividades antiinflamatória e antinociceptiva do extrato etanólico de folhas de Cenostigma macrophyllum Tul. var. Acuminata Teles Freire (Leguminosae-Caesalpinioideae)**. 2001. 150 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2001.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PIMENTA, A. S.; CASTRO, R. V. O.; MARINHO, I. V.; TRUGILHO, P. F.; ALVES, I. C. N.; CASTRO, A. F. N. M. Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no estado do Rio Grande do Norte⁴. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 491-502, 2013.

SANTOS, R. M.; SILVA, J. F.; BARBOSA, A. P. Fixação biológica de nitrogênio em espécies nativas do Cerrado. **Acta Botanica Brasilica**, v. 34, p. 579-587, 2020.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). **Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF**. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/>. Acesso em: 27 set. 2024.

SILVA, C. J.; VALE, A. T.; MIGUEL, E. P. Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de Cerradão no estado de Tocantins. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 63-75, 2015.

SILVA, E. D. G.; ALVES, A. R.; HOLANDA, A. C.; BEZERRA, R. M.; MAGALHÃES, A. S. Biomassa e nutrientes na parte aérea de espécies arbóreas da Caatinga, Rio Grande do Norte. **Nativa**, v. 10, p. 131-137, 2022.

SILVA, G. C.; SAMPAIO, E. V. S. B. Biomassas de partes aéreas em plantas da Caatinga. **Revista Árvore**, v. 32, p. 567-575, 2008.

SILVA, H. F.; RIBEIRO, S. C.; BOTELHO, S. A.; FARIA, R. A. V. B.; TEIXEIRA, M. B. R.; MELLO, J. M. Estimativa do estoque de carbono por métodos indiretos em área de restauração florestal em Minas Gerais. **Scientific Forest**, v. 43, 2015.

SILVA, H. R.; SILVA, C. C. M.; NETO, L. B. C.; LOPES, J. A. D.; CITÓ, A. M. G. L.; CHAVES, M. H. Constituintes químicos das cascas do caule de *Cenostigma macrophyllum*: ocorrência de colesterol. **Química Nova**, v. 30, p. 1877-1881, 2007.

SILVA, L. M. S.; FERREIRA, R. R.; MOURA, A. P. Potencial ecológico de *Cenostigma macrophyllum* em áreas de reflorestamento. **Ecology & Conservation**, v. 19, p. 30-309, 2021.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Chronicle**, v. 5, p. 220-224, 1982.

SOMOGYI, Z.; CIENCIALA, E.; MAKIPAA, R.; MUUKKONEN, P.; LEHTONEN, A.; WEISS, P. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. **European Journal of Forest Research**, v. 126, n. 1, p. 197-207, 2007.

SOUZA, T. C. T.; NASCIMENTO, V. T. Aspectos reprodutivos de *Cenostigma macrophyllum* Tull. (Fabaceae-Caesalpinioideae) em uma área de Cerrado em regeneração no Oeste da Bahia. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 3-12, 2018.

THE BRAZIL FLORA GROUP (BFG). **Flora do Brasil 2020**. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2021.

VIRGENS, A. P.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; PAULA, A.; CARVALHO, F. F.; ARAGÃO, M. D. A.; MONROE, P. H. M. Biomassa de espécies florestais em área de Caatinga arbórea. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, p. 555-561, 2017.

WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite Ikonos II**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

WATZLAWICK, L. F.; KOEHLER, H. S.; KIRCHNER, F. F. Estimativa de biomassa e carbono em plantios de *Pinus taeda* L. utilizando imagens do satélite IKONOS II. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, 3., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: [s.n.], 2004.

WATZLAWICK, L. F.; MARTINS, P. J.; RODRIGUES, A. L.; EBLING, Â. A.; BALBINOT, R.; LUSTOSA, S. B. C. Teores de carbono em espécies da floresta ombrófila mista e efeito do grupo ecológico. **Cerne**, v. 20, p. 613-620, 2014.

WEBER, K. S. **Manejo da bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) baseado no crescimento diamétrico de árvores individuais**. 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

XU, B.; PAN, Y.; PLANTE, A. F.; JOHNSON, A.; COLE, J.; BIRDSEY, R. Decadal change of forest biomass carbon stocks and tree demography in the Delaware River Basin. **Forest Ecology and Management**, v. 374, p. 1-10, 2016.