



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
TECNOLÓGICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SOCIEDADE, NATUREZA E
DESENVOLVIMENTO**

LIZANDRA ELIZEÁRIO DOS SANTOS

**MODELAGEM DE BIOMASSA E CARBONO DO COMPONENTE FLORESTAL EM
SISTEMA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA A PARTIR DE
CARACTERÍSTICAS DENDROMÉTRICAS E FÍSICO-QUÍMICAS OBTIDAS POR
INTERVENÇÃO SILVICULTURAL**

**SANTARÉM - PA
2024**

LIZANDRA ELIZEÁRIO DOS SANTOS

**MODELAGEM DE BIOMASSA E CARBONO DO COMPONENTE FLORESTAL EM
SISTEMA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA A PARTIR DE
CARACTERÍSTICAS DENDROMÉTRICAS E FÍSICO-QUÍMICAS OBTIDAS POR
INTERVENÇÃO SILVICULTURAL**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento para a obtenção do título de Doutora em Ciências Ambientais; Universidade Federal do Oeste do Pará; Área de concentração: Recursos Naturais, Biodiversidade e Bioprospecção na Amazônia.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Lucieta Guerreiro Martorano

**SANTARÉM - PA
2024**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

-
- S237m Santos, Lizandra Elizeário dos
Modelagem de biomassa e carbono do componente florestal em sistema integração
lavoura-pecuária-floresta a partir de características dendrométricas e físico-químicas
obtidas por intervenção silvicultural./ Lizandra Elizeário dos Santos. - Santarém, 2024.
135 p. : il.
Inclui bibliografias.
- Orientadora: Lucieta Guerreiro Martorano.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Pró-Reitoria de Pesquisa,
Pós-Graduação e Inovação tecnológica, Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza
e Desenvolvimento.
1. Serviço ambiental. 2. Espécies florestais. 3. Sistema de produção integrado. 4. Sus-
tentabilidade agroflorestal. 5. Modelos alométricos. I. Martorano, Lucieta Guerreiro,
orient.. II. Título.

CDD: 23 ed. 634.92

Bibliotecária - Documentalista: Cátia Alvarez – CRB/2 843

DEDICATÓRIA

À Deus, pela graça da vida e por ter me permitido a chegar até aqui;

Ao meu companheiro Ivo Alves, meu filho Daniel e enteada Débora;

Aos meus irmãos, Rodrigo e Fábio, por terem me inspirado ao longo da vida;

Aos meus pais, Lucivaldo e Idê, por sempre ter me dado o apoio incondicional em todos os momentos da minha vida;

A minha orientadora Dra. Lucieta Martorano, por ter sido uma verdadeira mãe científica;

Ao meu eterno pai científico e orientador desde a graduação, Dr. João Ricardo Vasconcellos Gama (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA), pela concessão da bolsa, essencial para o desenvolvimento deste trabalho e para a continuidade da minha formação acadêmica.

Na Universidade Federal do Oeste do Pará (Ufopa), que foi minha casa científica durante a graduação em Engenharia Florestal e no doutorado, proporcionando um ambiente rico para o aprendizado e o crescimento acadêmico.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento (PPGSND) e todos os professores e pesquisadores que, com dedicação e excelência, desenvolvem a formação de profissionais capacitados na Amazônia.

À Fazenda Nossa Senhora de Aparecida, localizada em Mojuí dos Campos - PA, pela parceria científica e por acreditar nos benefícios do sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), fundamental para a condução desta pesquisa.

À Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (Embrapa), especialmente à Embrapa Amazônia Oriental, por sua inestimável contribuição ao meu avanço científico e ao desenvolvimento desta tese.

À minha orientadora, Dra. Lucieta Guerreiro Martorano, por acreditar no meu potencial e aceitar dar continuidade à minha orientação no doutorado. Sou profundamente grata por todos os ensinamentos, conselhos e pelo apoio incondicional. Sua orientação foi um alicerce essencial nesta caminhada, e sua dedicação como "mãe científica" será sempre lembrada.

Ao professor Dr. João Ricardo Vasconcellos Gama (*in memoriam*), cuja amizade e incentivo foram decisivos para que seguir na carreira acadêmica. Minha eterna gratidão pelo apoio ao longo de minha trajetória científica e pela orientação da graduação ao doutorado.

Ao meu companheiro de vida, Ivo Alves, que presencia minha rotina acadêmica desde a minha primeira graduação em Licenciatura em Biologia. Agradeço seu apoio constante e paciência nos momentos em que precisei me dedicar exclusivamente às atividades acadêmicas.

Ao meu filho, Daniel Alves, por ser minha maior fonte de força e inspiração, muitas vezes sem saber, com seu sorriso contagiante e alegria genuína.

À minha enteada, Débora Alves, pela amizade e valiosa ajuda com seu conhecimento gráfico.

Aos meus pais, pelo suporte incondicional e por cuidarem do Daniel, permitindo que eu me concentrasse nas demandas do doutorado.

Aos meus irmãos, Rodrigo e Fábio, ao apoio e força ao longo dessa jornada.

Ao professor Dr. Thiago Vieira por ter conseguido enxergar meu potencial para pesquisa desde a graduação e, principalmente, pelas palavras de encorajamento para que eu continuasse na jornada do doutorado.

Meus sinceros agradecimentos aos pesquisadores da Embrapa: Dr. Paulo Fernandes, Dr. Arystides Resende e Dr. Roberto Giolo por todo conhecimento compartilhado, pela vasta experiência em ILPF.

Ao Dr. Carlos Tadeu, pela paciência e pelos ensinamentos na área de estatística, indispensáveis para a elaboração desta tese.

Ao Dr. Emanuel Araújo pela parceria científica e importantes considerações para evolução desta tese.

Ao querido Danilo Ataíde pela contribuição com o processamento de dados.

Aos colegas, técnicos e alunos do curso de graduação em Engenharia Florestal, pela disponibilidade em auxiliar nas atividades de campo e laboratório, com destaque especial para Airto, Koji, Luíza, Anselmo e Bruna Martins.

Ao Laboratório de Tecnologia da Madeira, pela disponibilização de infraestrutura para as análises elementares e de densidade da madeira, em especial ao professor Dr. Victor Moutinho, pela paciência e ensinamento com os procedimentos técnicos.

A Fabi e Melicia por todo apoio durante a condução desta pesquisa.

Aos meus amigos Afonso, Renato, Talita, Andrea, Jessica, Karla, Marcélia, Aurilene e Veridiana por contribuírem com palavras de incentivo e por emanarem energias positivas ao longo deste processo.

A todos que, direta ou indiretamente, apoiaram o desenvolvimento desta tese, minha mais sincera gratidão. Este trabalho é resultado do esforço coletivo de inúmeras pessoas que acreditaram na minha capacidade e contribuíram de diferentes formas para sua realização.

*“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo
para todo o propósito debaixo do céu.”*

Eclesiastes 3:1

RESUMO

O sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) vem apontando indicadores de sustentabilidade, tais como a redução das emissões de gases do efeito estufa pela melhoria da qualidade das pastagens e, conseqüentemente, pelo aporte de matéria orgânica, que aumenta a melhoria da qualidade do solo, refletindo em maior produtividade e bem-estar animal, garantindo a prestação de importantes serviços ambientais nas propriedades rurais. Neste estudo o objetivo foi realizar a modelagem de biomassa e carbono do componente florestal em um sistema ILPF a partir de características dendrométricas e físico-químicas obtidas por intervenção silvicultural. Em uma Unidade de Referência Tecnológica, localizada no município de Mojuí dos Campos, Pará, foi implantada em 2010 três espécies florestais, sendo duas nativas do bioma Amazônia que são a *Bertholletia excelsa* (Castanha-da-Amazônia) e a *Dipteryx odorata* (Cumaru), e uma exótica que é a *Khaya grandifoliola* (Mogno africano), em talhões de 0,92 ha com espaçamento de 7 m x 5 m. Após o primeiro desbaste das árvores com características fenotípicas indesejáveis, realizado em 2021, foram avaliadas características dendrométricas e físico-químicas, além da modelagem de biomassa e carbono de cada componente florestal no sistema ILPF. As análises incluíram diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (Ht), diâmetro de copa (DC), comprimento de copa (CC), área de projeção de copa (AC), percentual de copa (PC) e outros índices morfométricos. O teor de carbono foi determinado em folhas, galhos e fuste, enquanto a densidade da madeira (ρ) foi obtida em diferentes níveis de umidade (aparente, anidra e básica) com amostras de 85 árvores desbastadas, totalizando 425 discos de madeira. A biomassa foi calculada a partir do teor de umidade das folhas e galhos finos e pela cubagem dos galhos grossos e fuste. O carbono foi obtido a partir da biomassa e teor de carbono de cada compartimento da árvore. Com os dados de biomassa e carbono, foram ajustados seis modelos matemáticos, tendo DAP e Ht como variáveis preditoras. Critérios como coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro padrão de estimativa ($S_{yx\%}$), critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC), índice de concordância de Willmott (d) e análise gráfica de resíduos foram usados para selecionar o melhor modelo. A espécie com maiores características dendrométricas foi *K. grandifoliola*, com (DAP = 32,98 cm e Ht = 27,17 m). A *B. excelsa* destacou-se por apresentar maior DC, com média de 24,04 mm e AC de 462,13 m². O maior teor de carbono está nas folhas de *D. odorata* (52,14%) e da *B. excelsa* (50,68%). Observa-se que o *K. grandifoliola* armazena o maior teor de carbono no fuste (49,01%). As densidades da madeira variaram entre espécies, com *D. odorata* apresentando os maiores valores (ρ aparente = 0,99 g.cm⁻³; ρ anidra = 0,91 g.cm⁻³; ρ básica = 0,83 g.cm⁻³). O modelo de Spurr foi o mais eficiente, com $R^2_{aj.}$ = 0,92, $S_{yx\%}$ = 26,27 para biomassa, e $R^2_{aj.}$ = 0,92, $S_{yx\%}$ = 32,05 para carbono. Aos 11 anos, o componente florestal armazenou em média 254,25 kg (92,12 kg. ha⁻¹) de biomassa e 120,00 kg (43,48 kg. ha⁻¹) de carbono. A espécie *K. grandifoliola* apresentou os maiores estoques de biomassa (454,21 kg) e carbono (227,07 kg). Os resultados destacam a eficiência do sistema ILPF na captura e armazenamento de carbono, especialmente em plantios juvenis. As práticas silviculturais consolidam o sistema de produção pecuário, passivo de certificação por prestar importantes serviços ambientais, a partir da adoção de práticas sustentáveis na Amazônia.

Palavras-chave: Serviço ambiental. Espécies florestais. Sistema de produção integrado. Sustentabilidade agroflorestal. Modelos alométricos

ABSTRACT

The Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLF) system has been showing indicators of sustainability, such as the reduction of greenhouse gas emissions by improving the quality of pastures and, consequently, by providing organic matter that improves the quality of the soil, reflecting an increase in productivity and animal welfare, guaranteeing the provision of important environmental services on rural properties. The aim of this study was to model the biomass and carbon of the forest component in an ICLF system based on dendrometric and physical-chemical characteristics obtained through silvicultural intervention. In a Technological Reference Unit, located in the municipality of Mojuí dos Campos, Pará, three forest species were implemented in 2010, two of which are native to the Amazon biome, *Bertholletia excelsa* (Amazon Castanha) and *Dipteryx odorata* (Cumaru), and an exotic one, *Khaya grandifoliola* (African mahogany), in plots of 0.92 ha spaced 7 m apart x 5 m. After the first thinning of the trees with undesirable phenotypic characteristics, carried out in 2021, dendrometric and physicochemical characteristics were assessed, as well as biomass and carbon modeling of each forest component in the ICLF system. The analyses included diameter at breast height (DBH), total height (Ht), crown diameter (CD), crown length (CL), crown projection area (CA), crown percentage (CP) and other morphometric indices. Carbon content was determined in leaves, branches and stem, while wood density (ρ) was obtained at different humidity levels (apparent, anhydrous and basic) with samples from 85 thinned trees, totaling 425 wood discs. Biomass was calculated from the moisture content of the leaves and thin branches and by cubing the thick branches and stem. Carbon was obtained from the biomass and carbon content of each compartment of the tree. Six mathematical models were adjusted using the biomass and carbon data, with DBH and Ht as predictor variables. Criteria such as adjusted coefficient of determination ($R^2_{adj.}$), standard error of estimate ($S_{yx\%}$), Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) information criteria, Willmott's concordance index (d) and graphical analysis of residuals were used to select the best model. The species with the highest dendrometric characteristics was *K. grandifoliola*, with (DBH = 32.98 cm and Ht = 27.17 m). *B. excelsa* stood out for having the highest CD, with an average of 24.04 mm and CA of 462.13 m². The highest carbon content was found in the leaves of *D. odorata* (52.14%) and *B. excelsa* (50.68%). It can be seen that *K. grandifoliola* stores the highest carbon content in the stem (49.01%). Wood densities varied between species, with *D. odorata* showing the highest values (ρ apparent = 0.99 g.cm⁻³; ρ anhydrous = 0.91 g.cm⁻³; ρ basic = 0.83 g.cm⁻³). The Spurr model was the most efficient, with $R^2_{adj.}$ = 0.92, $S_{yx\%}$ = 26.27 for biomass, and $R^2_{adj.}$ = 0.92, $S_{yx\%}$ = 32.05 for carbon. At 11 years, the forest component stored an average of 254.25 kg (92.12 kg.ha⁻¹) of biomass and 120.00 kg (43.48 kg.ha⁻¹) of carbon. The *K. grandifoliola* species had the highest biomass (454.21 kg) and carbon (227.07 kg) stocks. The results highlight the efficiency of the ILPF system in capturing and storing carbon, especially in young plantations. Silvicultural practices consolidate the livestock production system, which is subject to certification for providing important environmental services through the adoption of sustainable practices in the Amazon.

Keywords: Environmental service. Forest species. Integrated production system. Agroforestry sustainability. Allometrics model

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Localização da Fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos, Pará, e tipologia climática do entorno, precipitação anual e base cartográfica (2021). Fonte: MARTORANO et al., 2021; SANTOS, 2024.....23
- Figura 2 - Visão geral da Unidade de Referência Tecnológica na fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos, Pará, Brasil. Fonte: SANTOS, 2024.....24
- Figura 3 - Seleção de árvores para desbaste no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará, Brasil. Fonte: SANTOS, 2024.....25
- Figura 4 - Esquema da disposição do componente florestal na ILPF, evidenciando as árvores que foram selecionados para análises morfométricas, dentro do pontilhado vermelho. Fonte: SANTOS, 2024.....26
- Figura 5 - Coleta das variáveis dendrométricas do componente florestal do sistema ILPF da fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos, Pará. **A.** circunferência à altura do peito. **B.** altura da árvore. **C.** medições dos raios da copa. Fonte: SANTOS, 2024.....27
- Figura 6 - Modelo ilustrativo de *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl. e suas características dimensionais. Fonte: SANTOS, 2024.....27
- Figura 7 - Distribuição diamétrica das árvores de *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....29
- Figura 8 - Comparação do crescimento, em diâmetro à altura do peito (DAP), de *Khaya grandifoliola* do presente estudo (triângulos com bordas azuis interligados) com outros plantios de *Khaya grandifoliola* ou *Khaya ivorensis* publicados na literatura. Fonte: SANTOS, 2024...31
- Figura 9 - Mapa de localização do sistema ILPF presente na fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....46
- Figura 10 - Etapas metodológicas para obtenção do teor de carbono do compartimento das árvores de *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....47
- Figura 11 - Teor de carbono, em %, das espécies *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....49
- Figura 12 - Comparação do teor de carbono, em %, presente nos compartimentos de *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*, em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....50
- Figura 13 - Interação do teor de carbono, em %, entre as espécies e compartimentos analisados de *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*, em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....51

Figura 14 - Mapa de localização da área de estudo com dados sobre a tipologia climática do entorno, precipitação pluviométrica anual e base cartográfica, provenientes do ano de 2021. Fonte: SANTOS, 2024.....	61
Figura 15 - Coleta de discos de madeira ao longo do fuste comercial. Fonte: SANTOS, 2024...	63
Figura 16 - Esquema metodológico para obtenção da densidade da madeira em diferentes níveis de umidade das árvores presente no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	63
Figura 17 - Perfil médio da variação da densidade básica ao longo do fuste da madeira de <i>Bertholletia excelsa</i> , <i>Dipteryx odorata</i> e <i>Khaya grandifoliola</i> , em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	67
Figura 18 - Dendrograma utilizando o método de ligação média entre as duas espécies nativas e as exóticas (<i>Bertholletia excelsa</i> , <i>Dipteryx odorata</i> e <i>Khaya grandifoliola</i>) comparando as densidades obtidas ao longo do fuste comercial, em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	69
Figura 19 - Elipses de confiança para o vetor de médias (95%), segundo as duas primeiras variáveis discriminantes canônicas entre as densidades básicas ao longo do caule das espécies <i>Bertholletia excelsa</i> , <i>Dipteryx odorata</i> e <i>Khaya grandifoliola</i> , considerando as densidades obtidas ao longo do caule comercial em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	71
Figura 20 - Mapa e localização da área de estudo e disposição das árvores no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	84
Figura 21 - Esquema metodológico para obtenção da biomassa e o carbono acima do solo presente no componente florestal do sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	85
Figura 22 - Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis obtidas dos componentes florestais presentes no ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	92
Figura 23 - Distribuição gráfica residual dos modelos de entrada simples e dupla ajustados para estimar a biomassa acima do solo do componente florestal plantado em ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	95
Figura 24 - Distribuição gráfica residual dos modelos de entrada simples e dupla ajustados para estimar o carbono acima do solo do componente florestal plantado em ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	96
Figura 25 - Representação gráfica dos valores observados de biomassa e carbono e estimados pelo modelo de Spurr, das espécies florestais presente no ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices morfométricos calculados para o componente florestal presente no sistema ILPF da fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos, Pará, Brasil. Fonte: DURLO; DENARDI, 1998; CUNHA; FINGER, 2013; SILVA et al., 2017; CARMONA et al., 2018.....	28
Tabela 2 - Estatística descritiva da altura total (Ht), altura do fuste (Hf), diâmetro à altura do peito (DAP) e diâmetro de copa (DC) dos componentes florestais, implantados em ILPF, Mojuí dos Campos, Pará, Brasil. Fonte: SANTOS, 2024.....	30
Tabela 3 - Médias e desvio padrão do comprimento de copa (CC), área de projeção de copa (AC), percentual de copa (PC), forma de copa (FC) das árvores presentes em sistema ILPF no município de Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	33
Tabela 4 - Médias, desvio padrão e coeficiente de variação do grau de esbeltez (GE), índice de abrangência (IA) e índice de saliência (IS) das árvores presentes em sistema ILPF no município de Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	34
Tabela 5 - Médias e desvio padrão e coeficiente de variação do incremento médio anual da altura (IMA _h), em m.ano ⁻¹ , e de incremento médio anual em diâmetro (IMA _d), em cm.ano ⁻¹ , para os componentes florestais, implantadas em ILPF no município de Mojuí dos Campos, Pará, Brasil. Fonte: SANTOS, 2024.....	35
Tabela 6 - Número de árvores coletadas de acordo com a classe diamétrica dos indivíduos selecionados. Fonte: SANTOS, 2024.....	62
Tabela 7 - Equações para obtenção da densidade da madeira do componente florestal presente no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: DOWNES et al. (1997); OLIVEIRA et al., 2019.....	64
Tabela 8 - Valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação para densidade aparente, anidra e básica, teste de Shapiro-Wilk e diâmetro à altura do peito (DAP) da madeira dos componentes florestais presentes no sistema ILPF. Fonte: SANTOS, 2024.....	65
Tabela 9 - Equações para obtenção do volume do fuste e do galho grosso do componente florestal presente no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006.....	86
Tabela 10 - Equações para obter a biomassa acima do solo e o carbono do componente florestal do sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	87
Tabela 11 - Teor de carbono (%) nos compartimentos das espécies <i>Bertholletia excelsa</i> , <i>Dipteryx odorata</i> e <i>Khayagrandidifoliola</i> presente no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS et al., 2023.....	87
Tabela 12 - Modelos matemáticos ajustados para estimar a biomassa e o carbono das árvores no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	88

Tabela 13 - Índices estatísticos para análise de equações alométricas para estimativa de biomassa e carbono presentes no componente florestal no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: AKAIKE, 1974; SCHWARZ, 1978; WILLMOTT, 1985; SCOLFORO, 1993; SANQUETTA et al., 2023.....	89
Tabela 14 - Estatísticas descritivas para as variáveis selecionadas das espécies florestais presentes no ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	90
Tabela 15 - Coeficientes e estatísticas dos modelos ajustados para biomassa acima do solo do componente florestal implantado em ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	93
Tabela 16 - Coeficientes e estatísticas dos modelos ajustados para o carbono do componente florestal implantado no ILPF, Mojuí dos Campos, Pará. Fonte: SANTOS, 2024.....	93

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Questão norteadora	4
1.2 Objetivo geral	4
1.3 Objetivos específicos	4
2 REVISÃO DE LITERATURA¹	5
2.1 <i>Bertholletia excelsa</i> (Humn. & Bonpl.)	5
2.2 <i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	7
2.3 <i>Khaya grandifoliola</i> C. DC.	8
2.4 Integração Lavoura-Pecuária-Floresta	10
2.5 Aporte e crédito de carbono	15
3 CAPÍTULO I - MORFOMETRIA DE <i>Bertholletia excelsa</i> Humn. & Bonpl., <i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.), Willd.) e <i>Khaya grandifoliola</i> C. DC. EM SISTEMA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA AMAZÔNIA	19
Resumo	20
3.1 Introdução	21
3.2 Material e Métodos	22
3.2.1 Área de estudo	22
3.2.1.1 Histórico da área de estudo	23
3.2.2 Coleta de dados	25
3.2.2.1 Índices morfométricos	27
3.2.3 Análise de dados	28
3.3 Resultados e Discussão	29
3.4 Conclusão	36
Referências Bibliográficas	37
4 CAPÍTULO II - TEOR DE CARBONO EM FOLHAS, GALHOS E FUSTES DE <i>Bertholletia excelsa</i> Humb. & Bonpl., <i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd. e <i>Khaya grandifoliola</i> C. DC. EM SISTEMA DE PRODUÇÃO INTEGRADO NA AMAZÔNIA	42
Resumo	43
4.1 Introdução	44
4.2 Material e Métodos	45
4.2.1 Área de estudo	45
4.2.2 Coleta de dados	47
4.2.3 Análise de dados	49
4.3 Resultados e Discussão	49
4.4 Conclusão	52

Referências Bibliográficas.....	52
5 CAPÍTULO III - DENSIDADE DA MADEIRA DE ESPÉCIES FLORESTAIS EM SISTEMA INTEGRADO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA: desafios e oportunidades para <i>Bertholletia excelsa</i>, <i>Dipteryx odorata</i> e <i>Khaya grandifoliola</i>	56
Resumo	57
5.1 Introdução.....	58
5.2 Material e Métodos.....	60
5.2.1 Área de estudo.....	60
5.2.2 Coleta de dados.....	62
5.2.3 Análise de dados.....	64
5.3 Resultados e Discussão	65
5.3.1 Diferenças nos tipos de densidade e suas implicações para a ILPF.....	65
5.3.2 Variação longitudinal da densidade básica da madeira	66
5.4 Conclusão	72
Referências Bibliográficas.....	72
6 CAPÍTULO IV - AJUSTE DE MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA E O CARBONO DO COMPONENTE FLORESTAL EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA	80
Resumo	81
6.1 Introdução.....	82
6.2 Material e Métodos.....	83
6.2.1 Área de estudo.....	83
6.2.2 Coleta de dados.....	85
6.2.3 Análise de dados.....	87
6.3 Resultados e Discussão	90
6.4 Conclusão	99
Referências Bibliográficas.....	100
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
ANEXOS	119

1 INTRODUÇÃO

Na década de 1950 (Século XX), a ocupação da Amazônia brasileira foi marcada por iniciativas de integração nacional que contaram com a criação da Superintendência para Valorização Econômica da Amazônia (SPVEA) e da inauguração da rodovia Belém-Brasília, em 1955. Essa política pública teve como meta o incentivo a migração de trabalhadores e investidores de outras regiões do país, que promoveram um novo fluxo regional com aumento da população nas capitais e surgimento de municípios nos estados da Amazônia Legal (TAVARES, 2011).

Durante o regime militar, as áreas que não fossem cultivadas eram consideradas terras devolutas, amparadas pelo Decreto nº 3.641 de 1966 e apoiadas por planos de desenvolvimento como o I PND (1972-1974) e o II PND (1974) que promoveram a abertura de áreas para cultivos agrícolas, fortalecendo o setor agropecuário, atrelada à exploração florestal com incentivos do POLAMAZÔNIA (GUMIERO, 2022; BECKER, 2005).

Esse processo resultou em intenso desmatamento ao longo das rodovias, marcado pela produção madeireira e expansão agropecuária, especialmente nas áreas conhecidas como “arco do desmatamento”, que abrangem áreas no Pará, Mato Grosso, Rondônia, Maranhão e Tocantins (DIAS-FILHO, 2014). Entre 1980 e 1990, tecnologias para recuperação de pastagens degradadas ganharam destaque, como o Sistema “Barreirão”, desenvolvido em Goiás, que integrou arroz e pastagem, resultando em benefícios econômicos e ambientais (KLUTHCOUSKI et al., 1991).

A década de 1990 foi marcada por iniciativas para testar sistemas integrados, inclusive com a disseminação do sistema plantio direto e rotação de culturas, promovendo a conservação do solo e aumentando a capacidade produtiva em terras agrícolas (AMBROSI et al., 2001). A região passou a ser ocupada pela cultura de grãos, especialmente a *Glycine max* (soja), consolidando uma nova fronteira agrícola, com destaque para os estados do Mato Grosso e Pará (CARVALHO; DOMINGUES, 2016; DOMINGUES et al., 2020).

Em 2013, com base na Lei nº 12.805, foram criadas medidas que incentivassem a adoção de sistemas integrados que apontassem indicadores de sustentabilidade. Foram incentivados o desenvolvimento de projetos de pesquisa que apontassem resultados dos benefícios da adoção de sistemas que incluíssem componentes agrícola, pecuário e florestal, com foco na viabilidade econômica e na sustentabilidade ambiental (BRASIL, 2013).

Entre as políticas públicas, merece destaque para o Plano Setorial para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), cujo objetivo foi

promover práticas agrícolas sustentáveis que reduzissem as emissões de gases de efeito estufa (GEE) nos sistemas de produção agropecuário. O plano fortalecia a recuperação de pastagens degradadas, a adoção do sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) em sistema plantio direto, entre outras tecnologias, visando aumentar a eficiência e reduzir os impactos ambientais (BRASIL, 2012).

Esses movimentos transformaram profundamente a paisagem amazônica, exigindo a adoção de sistemas produtivos sustentáveis como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), que busca aliar a produção e a conservação ambiental, considerado uma abordagem inovadora, capaz de combinar componentes agrícolas, pecuários e florestais de forma sinérgica (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011; ARAÚJO et al., 2023). Esse modelo apresenta vantagens como a recuperação de áreas degradadas, a diversificação de atividades econômicas e a prestação de serviços ambientais, incluindo a captura e armazenamento de carbono, fatores essenciais na mitigação das mudanças climáticas e na promoção de práticas sustentáveis (ASSIS et al., 2022).

A inclusão do componente florestal no sistema ILPF desempenha um papel central (DE FACCIO CARVALHO et al., 2024), fornecendo não apenas recursos madeireiros e não madeireiros, mas também serviços ambientais essenciais (MONTEIRO et al., 2024). O manejo silvicultural adequado, incluindo intervenções como desbastes seletivos, contribui para melhorar o desempenho do sistema, potencializando sua capacidade de sequestro de carbono e melhorando a saúde e a qualidade do povoamento. Estudos que avaliam a morfometria das espécies florestais implantadas são fundamentais para compreender as relações interdimensionais entre características dendrométricas, como altura total, diâmetro à altura do peito (DAP) e diâmetro de copa (BALONEQUE et al., 2022; SILVA et al., 2020; CARMONA et al., 2018; CONDÉ et al., 2013). Esses dados fornecem subsídios importantes para decisões de manejo e práticas de valorização ambiental.

Além disso, verifica-se a importância da quantificação do teor de carbono armazenado nos diferentes compartimentos das árvores – fuste, galhos e folhas – auxiliando principalmente no entendimento da dinâmica do carbono em sistemas ILPF (DALLAGNOL et al., 2011; WATZLAWICK; SANQUETTA; ARCE, 2003; LEITE et al., 2023). A análise detalhada permite identificar indicadores que podem ser utilizados em certificações de serviços ambientais e políticas de pagamento por serviços ecossistêmicos. A variação na densidade da madeira entre espécies e ao longo do fuste também se destaca como um parâmetro essencial para estimar com precisão o armazenamento de biomassa e carbono, além de determinar o potencial madeireiro das espécies em diferentes condições de umidade (SILVA et al., 2022).

A busca por sistemas produtivos sustentáveis que integrem a conservação ambiental e o desenvolvimento econômico vem ganhando destaque nos últimos anos, especialmente em regiões como a Amazônia, onde os desafios relacionados ao uso do solo e à manutenção da biodiversidade são intensos. Nesse contexto, o sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) apresenta-se como solução estratégica para promover a recuperação de áreas degradadas, aumentar a produtividade agropecuária e florestal e prestar serviços ambientais, como o sequestro de carbono, regulação térmica, provisão em produtos madeireiro e não madeireiro e garantia de novas oportunidades econômicas e ambientais no sistema pecuário da região (MARTORANO et al., 2021). Entretanto, a variabilidade nos teores de carbono entre espécies e compartimentos, reforça a necessidade de análises detalhadas, especialmente para a certificação ambiental e políticas de pagamento por serviços ecossistêmicos (VIEIRA et al., 2009).

Outro aspecto essencial é a densidade da madeira, que influencia não apenas o valor madeireiro das espécies, mas também a sua capacidade de armazenar carbono. Avaliar essa característica em condições específicas de sistemas ILPF na Amazônia permite entender melhor o papel das espécies florestais na estruturação do sistema e na prestação de serviços ambientais. Além disso, a partir de intervenções silviculturais é possível calibrar modelos alométricos para estimar biomassa e carbono capazes de mensurar com precisão os estoques e a dinâmica do carbono em áreas com esses sistemas integrados na região (SANQUETTA et al., 2014; NHADUCO et al., 2021; NEVES et al., 2022).

A gestão de sistemas ILPF se destaca pelo uso de modelos alométricos como ferramenta para estimar biomassa e carbono. Esses modelos, fundamentados em variáveis dendrométricas como o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total, proporcionam maior precisão na avaliação dos estoques de carbono e biomassa. Essa precisão é fundamental para demonstrar o potencial de consolidação desses sistemas como alternativas produtivas sustentáveis (ASSIS et al., 2022).

Além disso, as análises evidenciam a eficiência do sistema ILPF na captura de carbono, contribuindo não apenas para a recuperação de áreas degradadas, mas também para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, especialmente em regiões com altas emissões de gases de efeito estufa (GEE), como áreas de pastagens degradadas. Assim, esses sistemas de produção oferecem subsídios para a adoção de práticas de manejo mais eficazes, ao mesmo tempo que destacam a importância do componente florestal na promoção da sustentabilidade e na redução dos impactos ambientais na Amazônia brasileira.

O estudo foi dividido em quatro capítulos: I) Morfometria de *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl., *Dipteryx odorata* (Aubl.), Willd.) e *Khaya grandifoliola* C. DC. em sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na Amazônia; II) Teor de carbono em folhas, galhos e fustes de *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl., *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. e *Khaya grandifoliola* C. DC. em sistema de produção integrado na Amazônia; III) Densidade da madeira de espécies florestais em sistema Integrado Lavoura-Pecuária-Floresta na Amazônia brasileira: desafios e oportunidades para *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*; IV) Ajuste de modelos alométricos para estimativa de biomassa e o carbono do componente florestal em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta na Amazônia brasileira.

1.1 Questão norteadora

Qual o potencial de estoque de carbono e de biomassa do componente florestal em sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, considerando a variação entre espécies e a modelagem alométrica para estimativas precisas?

1.2 Objetivo geral

Analisar as características dendrométricas e físico-químicas do componente florestal do sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, com o objetivo de estimar biomassa e carbono, além de validar modelos alométricos para a previsão de estoques de carbono e biomassa.

1.3 Objetivos específicos

- I. Analisar os índices morfométricos do componente florestal no sistema ILPF após intervenção silvicultural, visando compreender as características dendrométricas e as relações interdimensionais das espécies avaliadas.
- II. Quantificar o teor de carbono presente nos diferentes compartimentos do componente florestal no sistema ILPF, utilizando análises destrutivas para identificar as variáveis relevantes no armazenamento de carbono.

- III. Avaliar a densidade da madeira em diferentes níveis de umidade das espécies florestais presentes no sistema ILPF, para compreender a variabilidade dessa propriedade física em árvores jovens.
- IV. Ajustar e validar modelos alométricos para a estimativa de biomassa e carbono em árvores jovens no sistema ILPF.

2 REVISÃO DE LITERATURA¹

2.1 *Bertholletia excelsa* (Humn. & Bonpl.)

A espécie *Bertholletia excelsa* (Humn. & Bonpl.), popularmente denominada de castanha-da-Amazônia (WADT et al., 2023), pertence à família Lecythidaceae. É árvore emergente da Amazônia, encontrada em florestas de terra firme com cerca de 300 espécies, em 25 gêneros, sendo que apenas 150 espécies e 10 gêneros ocorrem no Brasil (NASCIMENTO; CARVALHO; MÜLLER, 2010; SOUSA; ALMEIDA; AMARAL, 2014).

As maiores árvores de *B. excelsa* podem atingir 50 m de altura e aproximadamente 200 cm de diâmetro à altura do peito (DAP) (SALOMÃO et al., 2014). Em alguns casos raros, por ser uma espécie de grande porte, as árvores da castanha-da-Amazônia chegam a medir 60 m de altura e apresentar um diâmetro variando entre 446 cm e 525 cm na idade adulta (WADT et al., 2023). As castanheiras apresentam tronco geralmente reto, ausência de galhos e podem possuir até 25 m de comprimento de fuste (CARVALHO, 2014).

B. excelsa possui preferência por áreas com precipitação média anual de 1.400 mm a 2.800 mm, temperatura anual média de 24°C a 27°C, e umidade relativa anual média de 79% a 86% (DINIZ; BASTOS, 1974). Além disso, é uma espécie heliófila, o que a torna dependente de clareiras para o seu crescimento, sobrevivência das plântulas e indivíduos jovens (MORI; PRANCE, 1990; SCOLES; KLEIN; GRIBEL, 2014). Sendo assim, essa planta clímax é naturalmente encontrada em áreas preservadas, ocupando o extrato superior da floresta (LORENZI, 2000), denominado por Ter Steege et al. (2013), como uma espécie hiperdominante na floresta nativa.

¹ Informações contidas nesse tópico foram publicadas em: SANTOS, L. E.; GOMES, K. M. A.; MARTORANO, L. G.; GAMA, J. R. V. Crescimento e Produção de plantios florestais de espécies nativas da Amazônia brasileira. In: MELO, S.; BRASILEIRO, T. S. A. (Org). **Sociedade, Natureza e Desenvolvimento na Amazônia**. 2 ed. Santarém, Ufopa, EDITORA CRV, 2020. p. 137-158.

Na floresta nativa, está distribuída de forma agregada, conhecida como reboleiras, que podem ter até 100 indivíduos. Deste modo, esta espécie é considerada social, devido à sua frequência em certos ambientes e sua relação com outras espécies também de grande porte (CARVALHO, 2014; VIEIRA et al., 2021).

Os frutos da *B. excelsa* são ouriços lenhosos, arredondados, secos e formam uma cápsula esférica que pode pesar entre 200 g a 1,5 kg (TONINI; ARCO-VERDE, 2004; MAUÉS et al., 2015). No ambiente natural, os frutos são abertos e dispersos pela fauna, principalmente por *Dasyprocta* spp. (cutia) (MAUÉS et al., 2015). Os frutos possuem geralmente 17 sementes em árvores de floresta nativa. As sementes tendem a ser angulares e apresentam um tegumento endurecido que contém em seu interior a amêndoa (DIONISIO et al., 2017), também apresentam superfície rígida e rugosa, com comprimento que varia entre 4 cm a 7 cm (TONINI; ARCO-VERDE, 2004).

Dentre os produtos florestais não-madeireiros da Amazônia, a semente de *B. excelsa* é um dos mais conhecidos e bem estabelecidos no mercado nacional e internacional, sendo uma espécie-chave para comunidades tradicionais, como fonte de alimentação e de renda por várias gerações (WALDHOFF; SOUZA; VIDAL, 2022).

Além da amêndoa como principal produto, existem também os subprodutos que podem ser utilizados para a geração de renda, como o óleo, farelo, leite de castanha, o próprio ouriço, bem como a madeira de boa qualidade advinda de reflorestamento (COLLARES, 2006).

A Bolívia se destaca na produção e exportação de *B. excelsa*, conquistando o mercado internacional devido à exigência dos produtores e exportadores em relação a aflatoxina (composto tóxico produzido pelos fungos *Aspergillus flavus* e *Aspergillus parasiticus*), que ocorre no armazenamento e secagem da semente (VIEIRA et al., 2022). A quantidade de aflatoxina, acima do recomendável, encontrada nas sementes, já impediu que o Brasil exportasse o produto para os Estados Unidos e para países da União Europeia (FREIRE et al., 2007).

A partir do momento que a Bolívia teve maior preocupação com a segurança alimentar, o mercado internacional abriu espaço para as castanhas oriundas do país, chegando a R\$ 800 milhões a produção no ano de 2019 (COSLOVSKY, 2021).

No Brasil, o Amazonas foi o estado que mais produziu amêndoas de *B. excelsa*. Em 2020, foram comercializadas cerca de 11.707 toneladas, com valor da produção de R\$ 34,8 milhões, equivalente a 35,3% do total (IBGE, 2020). O Pará ficou em segundo lugar, com 8.643 toneladas produzidas e R\$ 20,8 milhões em valor de produção (IBGE, 2020).

2.2 *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.

Dipteryx odorata (Aubl.) Willd. é uma espécie pertencente à família Fabaceae e dependendo da região é conhecida como cumaru, cumaru do Amazonas, cumbari, sarrapia, cumaru roxo, cumaru ferro, cumaru da folha grande, cumaru verdadeiro, cumari e internacionalmente como *fava tonka* (CARVALHO, 2009). *Dipteryx* diz respeito ao formato das flores parecidas com duas asas, já o epíteto *odorata* refere-se ao aroma do composto químico denominado cumarina (GARCIA, 2013).

Trata-se de uma espécie de clímax, com crescimento rápido ou demandante de luz, podendo atingir até 35 m de altura e 1,15 m de diâmetro na altura do peito (DAP), e emergir acima do dossel (JÁUREGUI et al., 2011). Desse modo, é considerada uma árvore de grande e médio porte, o que justifica olhares relevantes no que diz respeito ao manejo florestal de áreas degradadas da Amazônia (FÁBIO; CÂNCIO, 2019).

O lenho de *D. odorata* apresenta brilho moderado, altamente denso, duro ao corte, com grã reversa, textura fina, aspecto fibroso atenuado, superfície pouco lustrosa e cerne e alburno distintos pela cor (ELEOTÉRIO; SILVA, 2012). O cerne possui resistência elevada ao ataque de xilófagos e seus anéis de crescimento são distintos (SANTOS, 2002; IPT, 2011).

O padrão de floração não é o mesmo para todas as regiões, visto que algumas árvores podem florescer na temporada de chuvas, de maio a junho, e a maioria florescer na temporada seca, de setembro a novembro (JÁUREGUI et al., 2011). No Pará, a floração acontece de agosto a outubro, no Amazonas, de setembro a outubro, e em Pernambuco, em dezembro (SANTOS, 2002).

Os frutos do cumaru são do tipo drupa, apresentam endocarpo duro, podem atingir em média 3 cm e possuem uma única semente de rápida germinação (JÁUREGUI et al., 2011). O principal vetor de polinização é a abelha de variadas espécies, e a dispersão das sementes pode ser barocórica e também por morcegos ou roedores (SANTOS, 2002).

D. odorata apresenta-se como uma das espécies de maior destaque no mercado, manipulado de diversas formas (sendo muda, madeira, amêndoa) por comunidades locais amazônicas desde séculos anteriores, sendo que nacionalmente a expansão de venda se iniciou por volta do século XIX e XX, e no século XXI internacionalmente (FÁBIO; CÂNCIO, 2019; PORTELA; PAULETTO, 2020).

A madeira de *D. odorata* tem o uso bastante variado, sendo útil para a construção civil, naval e até mesmo para a confecção de móveis (CARVALHO, 2009). Devido a sua alta resistência e durabilidade é muito valorizada, podendo custar entre 248 a 750 U\$/m³ (madeira

serrada) em mercado nacional e internacional (SEFA, 2009). Além da madeira, é evidente a importância do óleo, que contém a substância química denominada cumarina, utilizada na indústria de cosméticos como fixadora de essências (PORTELA; PAULETTO, 2020). Outras indústrias que utilizam o cumaru são: perfumaria, medicamentos, alimentos, fumo e bebidas (SILVA; JARDIM; SILVA, 2010).

2.3 *Khaya grandifoliola* C. DC.

A espécie *Khaya grandifoliola* C. DC., popularmente conhecida como mogno africano, é uma árvore nativa da África, que pertence à família botânica Meliaceae (RIBEIRO; FERRAZ FILHO; SCOLFORO, 2017). Encontra-se distribuída desde o leste do Guiné até o Sudão e Uganda (OPUNI-FRIMPONG et al., 2008), em floresta de várzea, com solos úmidos e bem drenados. Ocorrências dessa espécie também foram pontuadas em florestas semidecíduas, de solos mais secos e em savanas, entretanto, ao longo de cursos d'água, em áreas com precipitação anual de 1.200 - 1.800 mm e um período de seca de 3 a 5 meses, em altitudes de até 1.400 m (CJB, 2012).

O mogno africano é uma árvore de grande porte, heliófila, que atinge até 40 m de altura e o fuste comercial pode alcançar até 23 m, com sapopemas de até 3 m; externamente, o fuste tem casca áspera, escamosa e cor marrom acinzentada, já internamente, a coloração varia de rosa-escuro à avermelhada, com listras brancas e com exsudação de substância viscosa e incolor (PRACIAK et al., 2013).

A copa tem formato arredondado, com galhos glabros, folhas paripenadas e compostas por três a cinco pares de folíolos, as margens são inteiras ou onduladas (PRACIAK et al., 2013). As flores são organizadas em inflorescências do tipo panículas axilares, podendo alcançar até 40 cm de comprimento, classificada como monoica, ou seja, possui flores unissexuais femininas e masculinas na mesma planta, sendo muito semelhantes em aparência, de coloração esbranquiçada e suavemente perfumadas (OPUNI-FRIMPONG et al., 2008).

Quanto aos frutos, esses têm cor marrom-acinzentada, com cinco valvas deiscentes, compostos de muitas sementes, consistem em cápsulas eretas e lenhosas, aproximadamente globosas, com diâmetro variando entre 6 cm a 9 cm. As sementes tem dispersão anemocórica, são de cor castanha com formato de disco ou quadrangular, bastante achatadas, com dimensões aproximadas de 2 cm x 3,5 cm (OPUNI-FRIMPONG et al., 2008). Em 1 kg de semente pode conter até 5.000 unidades e a germinação ocorre entre 10 a 35 dias após o semeio (OPUNI-FRIMPONG et al., 2008).

Os primeiros espécimes de *K. grandifoliola* foram plantados em 1976 na EMBRAPA Amazônia Oriental, em Belém-PA e identificados como *K. ivorensis* (FALESI; BAENA, 1999). Entretanto, os materiais foram analisados e detectaram diferenças morfológicas entre as plantas de *K. ivorensis* cultivadas na Reserva Natural da Vale do Rio Doce em Linhares, no estado do Espírito Santo (FRANK JUNIOR, 2022).

A dúvida permaneceu por aproximadamente seis anos, sendo desvendado com o apoio da Associação Brasileira dos Produtores de Mogno Africano (ABPMA), a partir das análises realizadas por especialista da República do Congo que veio especialmente para realizar a classificação taxonômica dos indivíduos, identificando que na EMBRAPA Amazônia Oriental os materiais são típicos de *K. grandifoliola* e da Reserva Natural da Vale do Rio Doce são *K. ivorensis* (FRANK JUNIOR, 2022).

A introdução de *K. grandifoliola* em plantio de monocultivo ou integrado ocorre desde de 1990 como alternativa para redução da exploração ilegal da madeira na Amazônia (REIS et al., 2019). O rápido crescimento tem se destacado em sistema integrados, devido à combinação com espécies de ciclo curto e a forragem aumentar as condições químicas e físicas do solo, como densidade, porosidade e teores de carbono orgânico (SILVA; SALES; VELOSO, 2016).

A sobrevivência das plantas de *K. grandifoliola* após a germinação é de 90%, por isso a produção de mudas geralmente é feita de forma seminal, porém, esse processo não consegue atender a alta demanda pela espécie, devido à dificuldade na coleta de sementes e redução do vigor em curto espaço de tempo (OPUNI-FRIMPONG et al., 2008; PINHEIRO et al., 2011). Frente a essa adversidade, a propagação vegetativa é uma alternativa, por meio da produção de mudas a partir de mini estaquias, utilizando como propágulos as partes apicais de brotos oriundos de mini cepas cultivadas (AZEVEDO et al., 2021).

As mudas em campo precisam de irrigação até o segundo ano de vida, mas apesar dessa necessidade de hidratação inicial, foi observado elevado percentual de sobrevivência e ótimas condições sanitárias para *K. grandifoliola* em consórcio com o milho (*Zea* sp.), em Curionópolis - PA (GONÇALVES et al., 2023). Outros casos de sucesso de integração com *Khaya* sp. no Brasil têm sido apresentados na literatura (FALESI; BAENA, 1999; AZEVEDO et al., 2011; SILVA et al., 2014; SALES et al., 2017).

Pode-se afirmar que o cultivo do gênero *Khaya* no Brasil está consolidado, com uma área de aproximadamente 50 mil hectares plantados, distribuídas na região Sudeste (50%), Centro-Oeste (25%), Norte (13%), Nordeste (6%) e Sul (6%) (FERRAZ FILHO et al., 2021). Embora a maior quantidade de mogno africano esteja presente no sudeste brasileiro, as

características edafoclimáticas mais adequadas para o desenvolvimento da espécie estão nas regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste (CASAROLI et al., 2018).

O potencial madeireiro da espécie é um de seus destaques no ambiente comercial, devido sua madeira ter alta resistência mecânica, estabilidade dimensional, apresenta cor e estética agradável, além da textura facilitar o acabamento, portanto, é direcionada para fabricação de portas e portais, na produção de lâminas, instrumentos musicais, indústria de armas e de materiais esportivos e, também, na construção naval (SILVA; VIDAURRE, 2019).

Geralmente, em transações comerciais internacionais, a madeira bruta e serrada é comercializada em lotes mistos de mognos africanos, devidos todas as espécies do gênero apresentarem alto valor comercial, entretanto, apesar de ter várias espécies envolvidas, a denominação fixada é a do *K. ivorensis* (ARNOLD, 2004). Atualmente, a madeira é comercializada por R\$ 6.802,11 o m³, houve uma valorização de 108,24% nesse produto desde de 2019, em que o preço do m³ era R\$ 2.778,65 (ITTO, 2022).

No Brasil, as plantações dos mognos africanos para fins comerciais, que incluem as espécies *K. ivorensis* e *K. grandifoliola*, ainda não alcançaram a idade de corte final, entre 18 e 20 anos (SANTOS et al., 2019). Porém, a partir de *Khaya grandifoliola* cultivado no Pará por meio da parceria firmada entre a ABPMA, profissionais da área e alguns músicos, já houve desbaste com indivíduos que apresentaram 8 a 10 anos e esse material foi destinado para confecção de pequenos objetos, como instrumentos musicais (LEMMENS, 2008; REIS et al., 2019). Além disso, a *K. grandifoliola* tem uso não madeireiro, principalmente na indústria medicinal, presente em produtos antifúngicos, anti-inflamatórios, inseticidas, e usados em doenças como malária (CASAROLI et al., 2018).

Com base nessas características, nota-se que a espécie *K. grandifoliola* apresenta tanto benefícios econômicos, quanto ambientais, com utilização em reflorestamento, proteção de remanescentes e sequestro de carbono em áreas que possuem plantios com essa espécie exótica, mas bem adaptada na região (CAMPELO; COELHO, 2023).

2.4 Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

O sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) baseia-se na combinação de atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área, por meio de cultivos consorciados, em rotação ou sucessão, adaptados às características regionais, ao bioma e ao perfil do produtor rural (SILVA et al., 2020). As variações espaço-temporais dos sistemas determinam sua complexidade e sua capacidade de imitar ecossistemas naturais, o que contribui

para a sustentabilidade e a recuperação de áreas degradadas (DE FACCIO CARVALHO et al., 2024).

Os sistemas de integração podem ser classificados em Integração Lavoura-Pecuária (ILP), que combina agricultura e pecuária; Integração Pecuária-Floresta (IPF), que inclui o componente florestal; e ILPF, que incorpora todas essas atividades (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011). Historicamente, essas práticas de consórcio surgiram da adaptação de métodos indígenas, mas enfrentaram desafios ao longo do tempo, como degradação do solo e falta de mecanização (KLUTHCOUSKI; AIDAR, 2003).

Nos anos 1980 e 1990, tecnologias para recuperação de pastagens degradadas ganharam destaque, como o Sistema “Barreirão”, desenvolvido em Goiás, que integrou arroz e pastagem, resultando em benefícios econômicos e ambientais (KLUTHCOUSKI et al., 1991). A década de 1990 também marcou a intensificação dos sistemas integrados com a disseminação do plantio direto e rotação de culturas, promovendo a conservação do solo e aumentando a produtividade (AMBROSI et al., 2001).

A consolidação da ILPF como política nacional em 2013, com a Lei nº 12.805, estabeleceu esse sistema como uma estratégia de produção sustentável, promovendo sinergias entre os componentes agrícola, pecuário e florestal, com foco na viabilidade econômica e na sustentabilidade ambiental (BRASIL, 2013). Além disso, o Plano Setorial para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), teve o objetivo de promover práticas agrícolas sustentáveis que reduzissem as emissões de gases de efeito estufa. Esse plano inclui a recuperação de pastagens degradadas, o sistema ILPF, o plantio direto, entre outras tecnologias, para aumentar a eficiência e reduzir os impactos ambientais da agropecuária (BRASIL, 2012).

A evolução do Plano ABC para ABC+, em 2020, ampliou as metas visando não apenas a redução de emissões, mas também a adaptação às mudanças climáticas, a neutralidade de carbono e o aumento da resiliência climática do setor agropecuário (SCHMIDT; SILVA; HERNÁNDEZ, 2023). O ABC+ enfatiza ainda mais a adoção de práticas sustentáveis, com foco em tecnologias que promovam maior sustentabilidade e eficiência no uso dos recursos naturais (BRASIL, 2021).

Nesse contexto, o sistema ILPF desempenha um papel central ao integrar diferentes atividades produtivas de forma sustentável, contribuindo para a eficiência no uso de recursos naturais e para a mitigação de impactos ambientais. As práticas promovidas pela ILPF também apoiam a meta de neutralidade de carbono, já que o componente florestal age como um

sumidouro de carbono, compensando as emissões da agricultura e da pecuária (PEZZOPANE et al., 2024).

Além disso, a ILPF contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) (ONU, 2015). O sistema apoia o ODS 2, que trata da Fome Zero e agricultura sustentável, ao aumentar a produtividade de forma eficiente e sustentável. O ODS 13, relacionado à ação contra a mudança global do clima, também é impactado positivamente pela integração de componentes florestais que sequestram carbono e promovem a adaptação climática (ONU, 2015). De forma indireta, a contribuição da ILPF para a redução da pobreza (ODS 1) está relacionada ao aumento da renda de pequenos produtores por meio da diversificação de atividades e da melhoria da produtividade (FARIA; VASCONCELLOS, 2024).

Atualmente, com 17,4 milhões de hectares adotando algum tipo de sistema de integração, o Brasil avança rumo à meta de 35 milhões de hectares de ILPF até 2030. Esse progresso é apoiado por parcerias público-privadas, como a representada pela Associação Rede ILPF, que promove a adoção dessas tecnologias de integração, visando tanto a sustentabilidade quanto o aumento da produtividade no setor agropecuário (REDE ILPF, 2024).

Dentre os componentes presentes na ILPF, o florestal é o que fica mais tempo no sistema e contribui com a diversificação das fontes de renda do produtor, oferecendo produtos madeireiros e não madeireiros, e ao mesmo tempo melhorando o conforto térmico para o gado (LOPES et al., 2021; CÂNDIDO et al., 2023). Esse conforto, por sua vez, promove ganhos em peso e na produção de leite, além de melhorar a imunidade dos animais, especialmente em regiões de clima quente (ALVES; KARVATTE JR., 2019). Em áreas frias, as árvores funcionam como quebra-ventos, protegendo contra geadas (LOPES et al., 2021; FARIA; VASCONCELLOS, 2024). Outro benefício das árvores é a captura de carbono, que contribui significativamente para a neutralização das emissões de gases de efeito estufa geradas pela agropecuária, desde que o manejo seja adequado (MONTEIRO et al., 2024).

Não existe uma espécie florestal ideal para ILPF, pois essa escolha varia conforme a região e os objetivos do sistema. A seleção da espécie florestal deve considerar a finalidade do plantio, as condições do solo e clima, o conhecimento sobre práticas agrossilviculturais, a produtividade e a rentabilidade, além da disponibilidade de sementes ou clones melhorados (SILVA et al., 2020).

Diversas espécies arbóreas têm potencial para compor sistemas ILPF, como pinus (*Pinus* sp.), teca (*Tectona* sp.), acácia (*Acacia* sp.) e seringueira (*Hevea* sp.). No entanto, o eucalipto (*Eucalyptus* sp.) é a espécie mais utilizada devido ao seu rápido crescimento, versatilidade no

uso da madeira e desenvolvimento monopodial, o que facilita seu manejo e aproveitamento em diferentes contextos (LOPES et al., 2021).

A predominância do gênero *Eucalyptus*, encontra-se na região sul e sudeste do Brasil, sendo o híbrido *Eucalyptus urograndis* e seus clones (principalmente H13, GG100 e AEC 144) os mais frequentes, devido as características de múltiplos usos e adequada adaptação a diversas condições edafoclimáticas (ARAÚJO et al., 2023).

Por outro lado, nas regiões Norte e Nordeste, há uma maior diversidade de espécies florestais utilizadas em sistemas de ILPF, refletindo a adaptação às condições locais. Martínez et al. (2019) destacam que, na região Norte, sistemas de ILPF têm sido usados com sucesso na recuperação de áreas degradadas, utilizando espécies adaptadas a essas condições regionais.

Diversos estudos identificaram espécies nativas e exóticas com desempenho eficaz nesse contexto, entre elas: espécies nativas - mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla*), bordão de velho (*Samanea tubulosa*), mulateiro (*Calycophyllum spruceanum*), cedro-doce (*Bombacopsis quinata*), taxi-branco (*Tachigali vulgaris*), paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*), cumaru (*Dipteryx odorata*), castanha-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*) e andiroba (*Carapa guianensis*); e espécies exóticas - eucalipto (*Eucalyptus* sp.), mogno-africano (*Khaya ivorensis*), teca (*Tectona grandis*) e gliricídia (*Gliricidia sepium*) (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011; SILVA; SALES; VELOSO, 2016; SILVA et al., 2017; SILVA; SALES, 2018).

No Nordeste, muitos sistemas de ILPF utilizam *Gliricidia sepium* e *Leucaena leucocephala* como componentes florestais. No entanto, outras espécies com potencial para compor esses sistemas na região também são destacadas, como o eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), algaroba (*Prosopis juliflora*), angico branco (*Anadenanthera colubrina*), aroeira (*Myracrodruon urundeuva*), jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) e sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*) (DRUMOND, 2012). Em algumas regiões, espécies frutíferas, como o coqueiro (*Cocos* sp.) e o cajueiro (*Anacardium* sp.), também são encontradas em sistemas ILPF. Um exemplo de arranjo é a combinação do coqueiro como componente florestal e a gliricídia, mantida em regime de poda e pastejo, como componente pecuário, promovendo um uso eficiente dos recursos e a diversificação produtiva (RANGEL et al., 2015).

Essa adaptação dos sistemas ILPF à diversidade de espécies reflete a capacidade de ajuste do sistema às diferentes condições edafoclimáticas do Nordeste. O estudo de Pezzopane et al. (2024) reforça essa perspectiva ao identificar a ILPF como o uso da terra mais adequado para promover a maior produtividade de biomassa acima do solo, desde que ocorra tratamentos

silviculturais conduzidos de forma eficiente, como o desbaste, que mantém a competição dentro de um nível que não diminui a produtividade das plantas do sub-bosque.

Outro aspecto importante para ressaltar sobre a ILPF é o seu papel como sumidouro e emissor de gases de efeito estufa (GEE). As árvores capturam carbono, armazenando-o em sua biomassa, especialmente quando a madeira é utilizada em construções, contribuindo para a mitigação do dióxido de carbono (CO_2). Em contrapartida, a principal fonte de emissão de GEE na pecuária é o metano (CH_4), resultante da fermentação entérica dos ruminantes, enquanto o óxido nitroso (N_2O) provém do uso de fertilizantes e resíduos orgânicos. A liberação de dióxido de carbono em menor escala também ocorre, principalmente devido à aplicação de insumos como cal e ureia (LEITE et al., 2023).

Estudo realizado por Monteiro et al. (2024) reforçam a eficiência dos sistemas integrados na compensação das emissões de GEE, evidenciando que todos os arranjos analisados apresentaram um saldo líquido negativo de carbono. Notavelmente, os sistemas com componente florestal demonstraram um sequestro de carbono superior, com uma média de 15,9 a 20,4 $\text{Mg CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ao longo de quatro anos de análise. Essa capacidade de sequestro não apenas contribui para a mitigação das mudanças climáticas, mas também cria oportunidades econômicas.

A comercialização de créditos de carbono, resultante da presença do componente florestal, representa um retorno econômico significativo. Oliveira et al. (2008) destacam que a inclusão de espécies como *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* em consórcio com pastagens pode gerar rentabilidade, especialmente a partir do desbaste realizado aos sete anos de idade, além da receita proveniente da venda de créditos de carbono. Esses aspectos econômicos reforçam a viabilidade do sistema ILPF como uma alternativa sustentável.

Ademais, os sistemas integrados têm demonstrado aumentar o estoque de carbono no solo em comparação a pastagens degradadas e monoculturas ao longo do tempo. As práticas conservacionistas de manejo do solo promovem o aumento do teor de matéria orgânica, resultante da maior diversidade florística, do aporte de serrapilheira e da presença de raízes no solo (RIBEIRO et al., 2023). Isso sugere que o histórico de manejo é um fator determinante para o aumento do estoque de carbono no solo, enfatizando a importância de práticas de manejo sustentável.

Nesse contexto, produtores rurais relataram diversos motivos para a adoção do sistema ILPF, incluindo o retorno financeiro associado ao aumento da produtividade, a redução da erosão em solos arenosos, a manutenção da fertilidade do solo e a necessidade de reforma das pastagens. Além disso, destacam a sustentabilidade financeira, agrícola e ambiental, o bem-

estar animal, e um ganho de 10% tanto na produção animal quanto na massa (DOMINGUES et al., 2021).

Entretanto, o pleno aproveitamento das vantagens da ILPF depende de um planejamento rigoroso e da condução correta dos sistemas, incluindo manejo da pastagem e observação das fases de rotação e sucessão (SKORUPA; MANZATTO, 2019). Apesar de políticas de incentivo, como o Plano ABC, existem limitações para a implementação da ILPF, como a falta de conhecimento técnico, assistência técnica insuficiente, altos custos iniciais e desafios logísticos, especialmente para produtores de base familiar (SANTOS et al., 2024).

Assim, a ILPF representa uma solução baseada na natureza que integra os desafios sociais e ambientais, promovendo simultaneamente a proteção dos ecossistemas e o bem-estar humano (IUCN, 2013). A ampliação desse sistema no Brasil tem sido possível graças à transferência de tecnologia e ao perfil inovador dos produtores, apoiados por parcerias com o setor produtivo e empresas de assistência técnica, que contribuem para uma agropecuária mais sustentável (SILVA et al., 2020).

2.5 Aporte e crédito de carbono

A contínua redução da cobertura florestal tem impactos globais sobre todos os seres vivos e gera diversos desafios ambientais (HUO; PENG, 2023). Aproximadamente 31% da superfície terrestre é composta por florestas, totalizando 4,06 bilhões de hectares. Desde 1990 até 2020, cerca de 178 milhões de hectares de florestas foram degradados ou destruídos para atender às demandas humanas (FAO, 2020).

Entre as principais consequências ambientais das atividades antropogênicas, destaca-se o aumento do efeito estufa, que acelera as mudanças climáticas e favorece a ocorrência de eventos climáticos extremos (SPIELAGEN, 2012).

A interferência humana no clima tornou-se evidente desde a Revolução Industrial, com um aumento de cerca de 50% na concentração de gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera, como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). O CO₂, em particular, é uma das maiores preocupações devido ao seu papel central nas mudanças climáticas globais e suas consequências adversas (FRANGETTO; GAZANI, 2002). E no Brasil, a Amazônia é o bioma que mais contribuiu com as emissões de CO₂ para atmosfera com a mudança do uso da terra (SANQUETTA et al., 2020).

As principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEEs) são a pecuária extensiva, o desmatamento, as queimadas e a queima de combustíveis fósseis (KOEHLER;

WATZLAWICK; KIRCHNER, 2002). A partir do Protocolo de Kyoto, estabelecido em 1992 e consolidado na Conferência das Partes de 1997, os mecanismos de redução dessas emissões ganharam destaque, com ênfase nos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL). Esses mecanismos visam reduzir os impactos ambientais por meio da obtenção de créditos de carbono (YU, 2004; MORAIS et al., 2017), incentivando projetos que promovam a mitigação das emissões de GEEs.

Dando continuidade a esses compromissos globais, o Brasil reafirmou sua postura em prol da mitigação das emissões de GEEs durante o Acordo de Paris, em 2015. Na ocasião, o país estabeleceu a meta de reduzir em 50% suas emissões até 2030, tomando como referência o ano base de 2005 (BRASIL, 2016). Esse compromisso está alinhado com iniciativas globais, como a Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+), que visam a redução do desmatamento e a promoção do manejo sustentável das florestas.

A vasta cobertura florestal e a biodiversidade do Brasil são essenciais para seus esforços de conservação e mitigação climática, além de apoiar a geração de créditos de carbono (ARTAXO, 2022). Com a crescente demanda internacional por esses créditos e o reconhecimento dos serviços ecossistêmicos e ambientais, o Brasil está estrategicamente posicionado para transformar sua riqueza natural em ativos econômicos sustentáveis (ALVES et al., 2024).

Nesse contexto, o mercado de carbono opera por meio da venda de créditos, onde 1 tonelada de carbono equivalente é igual a 1 crédito de carbono. Assim, o sequestro de carbono é tratado como uma moeda ambiental, comercializada por aqueles que precisam reduzir suas emissões, como empresas e países (BAALMAN; WHITE, 2014). Países incapazes de reduzir suas emissões podem compensar essa limitação pagando por cortes realizados em outros locais, validado por Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) (FERNANDES et al., 2007).

O sequestro de carbono, que é um serviço ambiental essencial, ocorre quando os vegetais fixam o carbono (C) presente na atmosfera em sua biomassa por meio da fotossíntese (RUSCHEL; DEMAMBORO, 2020). Neste processo, o CO₂ é retirado da atmosfera pelas plantas, transformando-se em compostos orgânicos que produzem carboidratos e oxigênio, o qual retorna à atmosfera (ASSAD et al., 2019).

Esse processo de sequestro de carbono é especialmente significativo porque o carbono é o componente mais abundante na biomassa das árvores, estando intimamente relacionado ao crescimento das plantas (WATZLAWICK et al., 2004). No entanto, a quantidade de carbono armazenada em um indivíduo arbóreo pode variar conforme diversos fatores, incluindo o

ambiente em que a árvore está situada, sua espécie e o compartimento da árvore que está sendo analisado (BRIANEZI et al., 2013; SILVA et al., 2022).

O balanço global de dióxido de carbono é diretamente influenciado pelas florestas, que armazenam carbono tanto na serrapilheira quanto na biomassa abaixo e acima do solo (WATZLAWICK et al., 2014). Ademais, a fixação de carbono em plantações florestais também se reflete no aumento da biomassa, incluindo produtos madeireiros e não madeireiros (LELES, 1995).

O carbono é relevante para questões ambientais e econômicas, portanto, é fundamental realizar estimativas precisas de seu conteúdo nas árvores. Para isso, podem ser utilizados métodos diretos, que envolvem a colheita e pesagem dos componentes da árvore, e métodos indiretos, como o processamento de imagens de satélites, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e modelos alométricos (GATTO et al., 2011; FAJARDO; TIMOFEICZYK JUNIOR, 2015).

Nesse contexto, Araújo et al. (2023) identificaram que o método mais utilizado para estimar biomassa na Amazônia é o não destrutivo, que se baseia em equações alométricas, enquanto, para a estimativa de carbono, a maioria dos pesquisadores recorre a fatores de conversão. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006) recomenda multiplicar o valor da biomassa por um fator de conversão geral de 0,5, aplicável em florestas tropicais quando não se tem conhecimento do teor exato de carbono de uma espécie.

No entanto, diversos estudos apontam que a utilização desse fator geral pode resultar em estimativas sub ou superestimadas do potencial real de estocagem de carbono em áreas florestais (WATZLAWICK et al., 2014; DALLAGNOL et al., 2011; SILVA et al., 2022). Diante disso, o setor florestal já tem desenvolvido projetos voltados para o mercado de carbono. Um exemplo notável é a indústria de celulose e papel brasileira, que tem implementado programas de fomento florestal e estabelecido parcerias com produtores rurais (VALDETARO et al., 2011).

Além disso, sistemas integrados como a integração lavoura-pecuária (ILP) e a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) são reconhecidos como mitigadores de GEEs, devido à sua capacidade de arranjo e produção (SCHMIDT; SILVA; HERNÁNDEZ, 2023). Nesse contexto, a ampliação de áreas plantadas, a proteção de florestas e a recuperação de áreas degradadas, em conjunto com o mercado de créditos de carbono, representam um caminho promissor para um desenvolvimento mais sustentável (MORAIS et al., 2017).

Adicionalmente, a integração de produtores rurais em projetos de fomento florestal é uma estratégia crucial para promover o bem-estar ambiental, social e econômico. Isso se deve

ao fato de que o reflorestamento de pequenas e médias propriedades é mais viável e contribui para a mitigação de impactos ambientais negativos, além de auxiliar na remoção de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera. Portanto, o uso sustentável das florestas para abordar os problemas relacionados às mudanças climáticas é uma solução promissora. Isso envolve o manejo florestal sustentável, que integra a floresta, a indústria e o mercado (PAIXÃO et al., 2006).

Segundo Sanquetta et al., (2020), se o Brasil continuar aplicando esforços contínuos para a redução dos GEEs ele consegue alcançar a meta estabelecida no acordo de Paris, nessa pesquisa foi elencada as evidências da redução das emissões de CO₂ por mudança no uso da terra.

3 CAPÍTULO I

MORFOMETRIA DE *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl., *Dipteryx odorata* (Aubl.), Willd.) e *Khaya grandifoliola* C. DC. EM SISTEMA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA AMAZÔNIA²

² O capítulo encontra-se de acordo com o Guia para elaboração e apresentação da produção acadêmica da Ufopa. Disponível em: <http://ufopa.edu.br/sibi/servicos-e-produtos/guia-de-normalizacao/>; e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

MORFOMETRIA DE *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl., *Dipteryx odorata* (Aubl.), Willd.) e *Khaya grandifoliola* C. DC. EM SISTEMA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA AMAZÔNIA

RESUMO: Os componentes florestais que compõem o sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) necessitam de conhecimentos sobre a morfometria das espécies plantadas para expressar as relações interdimensionais das características dendrométricas. O objetivo neste estudo foi analisar os índices morfométricos de *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* na Amazônia Oriental. O sistema ILPF foi implantado em 2010, na Fazenda Nossa Senhora de Aparecida, localizada em Mojuí dos Campos, município paraense, mas necessitava de intervenção silvicultural ao longo desses anos. Após o desbaste de árvores com características fenotípicas indesejáveis, foi realizado o inventário 100%, em 2022, sendo consideradas para as análises dos índices morfométricos 41 árvores de *B. excelsa*, 90 de *D. odorata* e 78 de *K. grandifoliola*, coletando-se dados de altura total (Ht), altura do fuste (Hf), diâmetro de copa (DC) e diâmetro à altura do peito (DAP), e calculados os índices morfométricos: área de copa (AC), percentagem de copa (PC), formal de copa (FC), grau de esbeltez (GE), índice de abrangência (IA), índice de saliência (IS), incremento médio anual em altura (IMA_h) e diâmetro (IMA_d). Os testes estatísticos aplicados foram Shapiro-Wilk, Bartlett, ANOVA e Tukey a 5%. Verificou-se que a *K. grandifoliola* apresentou as maiores médias de Ht (27,17 m), Hf (9,26 m) e DAP (32,98 cm), além de maior IMA_h (2,26 m.ano⁻¹) e IMA_d (2,75 cm.ano⁻¹). A *B. excelsa* destacou-se pelo maior DC (24,04 m), AC (462,13 m²) e FC (1,94 m), enquanto na *D. odorata* detectou-se o maior PC (75,49%), IA (1,26) e IS (90,27). O grau de esbeltez foi mais elevado na *K. grandifoliola* (84,11), indicando fustes mais eretos. A *B. excelsa* se destacou na amplitude de copas e a *D. odorata* expressou o menor crescimento. As características dendrométricas reforçam que o produtor necessita avaliar as diferenças morfométricas e de crescimento entre as espécies para tomada de decisão de manejos silviculturais em sistema ILPF.

Palavras-chave: Índices morfométricos. ILPF. Amazônia

ABSTRACT: The forest components that make up the Crop-Livestock-Forest Integration system (ILPF) require knowledge about the morphometry of planted species to express the interdimensional relationships of dendrometric characteristics. The objective of this study was to analyze the morphometric indices of *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* and *Khaya grandifoliola* in the Eastern Amazon. The ILPF system was implemented in 2010, at Fazenda Nossa Senhora de Aparecida, located in Mojuí dos Campos, a municipality in Pará, but required silvicultural intervention throughout these years. After thinning trees with undesirable phenotypic characteristics, a 100% inventory was carried out in 2022. For the analysis of morphometric indices, 41 trees of *B. excelsa*, 90 of *D. odorata*, and 78 of *K. grandifoliola* were considered. Data on total height (Ht), stem height (Hf), crown diameter (CD), and diameter at breast height (DBH) were collected, and morphometric indices were calculated, including crown area (CA), crown percentage (CP), crown form (CF), slenderness ratio (SR), coverage index (CI), salience index (SI), and mean annual increment in height (MAI_h) and diameter (MAI_d). Statistical tests applied included Shapiro-Wilk, Bartlett, ANOVA, and Tukey at 5%. It was found that *K. grandifoliola* exhibited the highest averages for Ht (27.17 m), Hf (9.26 m), and DBH (32.98 cm), as well as the highest MAI_h (2.26 m.year⁻¹) and MAI_d (2.75 cm.year⁻¹). *B. excelsa* stood out with the largest CD (24.04 m), CA (462.13 m²), and CF (1.94 m), while *D. odorata* demonstrated the highest CP (75.49%), CI (1.26), and SI (90.27). The slenderness ratio was highest for *K. grandifoliola* (84.11), indicating straighter stems. *B. excelsa* excelled in

crown amplitude, whereas *D. odorata* exhibited the lowest growth. The dendrometric characteristics highlight the need for producers to evaluate morphometric and growth differences among species to make informed silvicultural management decisions in ICLF systems.

Keywords: Morphometric indices. ICLF. Amazon.

3.1 Introdução

A Lei nº 12.805/2013 que institui a política nacional do sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), pontua vários objetivos, dentre eles que o sistema visa melhorar, de forma sustentável, a produtividade, a qualidade dos produtos e a renda das atividades agropecuárias em áreas já desmatadas, como alternativa aos monocultivos tradicionais (BRASIL, 2013).

A diversificação da produção por meio do sistema ILPF é uma realidade em vários biomas do Brasil, uma opção para a agropecuária tradicional, recuperação de áreas degradadas, melhoria das propriedades do solo e na saúde e bem-estar animal, além de contribuir para captura dos gases de efeito estufa (FREIRE; CAVICHIOLI, 2022; TONUCCI, 2023).

O planejamento da implementação do sistema ILPF é fundamental para o seu sucesso, portanto, é necessário extrair coeficientes de produção e informações sobre os componentes que se fazem presentes, sejam eles perenes ou intermitentes (LOPES et al., 2021). Entre componentes vegetais que ficam mais tempo no sistema, destacam-se as espécies florestais, portanto, a escolha da espécie requer uma maior atenção, visto que influenciará diretamente no arranjo escolhido, influenciando o seu desenvolvimento e os dos componentes agrícolas (RODRIGUES et al., 2019).

O componente florestal pode alterar a captura de nutrientes, água e luz, porém, também são responsáveis pelo desenvolvimento do ambiente radicular, maior aporte de carbono orgânico no solo e diminuição da temperatura no ambiente, promovendo conforto térmico aos animais (CÂNDIDO et al., 2023; SILVA et al., 2021).

Desse modo, informações sobre o desenvolvimento das espécies florestais em sistemas integrados são cruciais, e vão além dos conceitos mais conhecidos no meio acadêmico como: diâmetro à 1,30 m do solo (DAP), área basal, a altura (total, fuste, comercial, dominante), a área de projeção de copa e o volume de copa, sendo necessário fazer relações interdimensionais como esses dados, para subsidiar tomadas de decisões e tratamentos silviculturais (DURLO, 2001).

Na Ciência Florestal, a área que expressa tais informações chama-se morfometria, teve como precursores Burguer (1939) e Assman (1961), que fizeram análises das copas das árvores para inferir sobre o espaçamento e o grau de competição existente entre as plantas, e a partir desses dados, obteve-se informações que acrescentam a decisão sobre o momento ideal para desbaste, desrama e outros tratamentos silviculturais para o aumento da produção ou monitoramento do povoamento (CONDÉ et al., 2012).

Portanto, o objetivo foi analisar os índices morfométricos de *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl., *Dipteryx odorata* (Aubl.), Willd.) e *Khaya grandifoliola* C. DC., com 12 anos, em sistema ILPF.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na Unidade de Referência Tecnológica (URT), em sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), localizada na fazenda Nossa Senhora de Aparecida, em parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Amazônia Oriental) e o produtor rural, sob contrato de nº 22500.10/0039. A URT está localizada no município de Mojuí dos Campos, entre as coordenadas geográficas 02°38'11" S e 54°56'13" W, distante 37 km do centro de Santarém (BR 316/Santarém-Cuiabá), região Oeste do Pará.

A tipologia climática predominante é Am₃, tal classificação foi estabelecida por Martorano, Pereira e Nechet (1993), a partir da adaptação classificação de Köppen (1936), indicando que existem meses com chuvas inferiores a 60 mm e precipitação anual variando entre 2.000 mm a 2.500 mm, sendo que o período mais chuvoso ocorre de dezembro a maio, concentrando 80% do volume pluvial, e o menos chuvoso (20%) de junho a novembro (MARTORANO et al., 2021). Ao observar o mapa de deficiência hídrica com valores variando entre 120 mm a 180 mm (Readily available water - RAW = 300 mm), indica-se que essas são condições de estoques médios de água no solo para plantas adultas (Figura 1). De acordo com Costa et al. (2018), a área de estudo é regida por temperaturas médias de 26,5°C. O solo predominante da região é classificado como Latossolo Amarelo, de textura média a muito argilosa, profundos e bem drenados e a vegetação predominantemente ombrófila densa de terra firme (OLIVEIRA JÚNIOR; CORREA, 2001).

Figura 2 – Visão geral da Unidade de Referência Tecnológica na fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos, Pará, Brasil.



Fonte: SANTOS, 2024.

A *Brachiaria ruzizienses* foi utilizada como cultura de cobertura durante quatro anos consecutivos, até que, com o desenvolvimento das árvores, uma pastagem de *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaça foi implantada, visando mitigar danos às árvores causados pela presença do gado. Além disso, as áreas com árvores foram projetadas para oferecer sombra ao gado após o pastejo em locais expostos ao sol (CÂNDIDO et al., 2023).

O cultivo de grãos nas entrelinhas das árvores foi realizado em sistema de rotação, com a alternância de soja (cultivar Tracajá), milho (BRS 1040) e arroz (cultivar Best). Após a colheita dos grãos, a forrageira *Brachiaria ruzizienses* foi semeada a uma densidade de 20 kg.ha⁻¹ como cultura de cobertura. Durante os primeiros quatro anos, ocorreu o replantio de mudas para compensar a mortalidade, bem como a realização de coroamento e poda de ramos. O cultivo de grãos, pelo sistema de plantio direto, seguiu até 2015, quando foi substituído pela

pastagem de *Panicum maximum* cv. Mombaça, mantida nos anos subsequentes (SILVA et al., 2018).

A partir de 2015, não houve cultivo agrícola e tratamento silvicultural nas árvores. Portanto, para fins de pesquisa científica, foi solicitado em janeiro de 2020 à Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMMA) de Mojuí dos Campos, Pará (Protocolo nº27/2020 – ANEXO I), o desbaste de árvores da ILPF visando diminuir o adensamento, com a eliminação principalmente de árvores com características fenotípicas não favoráveis para o sistema, como: fustes tortuosos, ataque de insetos ou outros patógenos, além de árvores mortas (Figura 3).

Figura 3 – Seleção de árvores para desbaste no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará, Brasil.



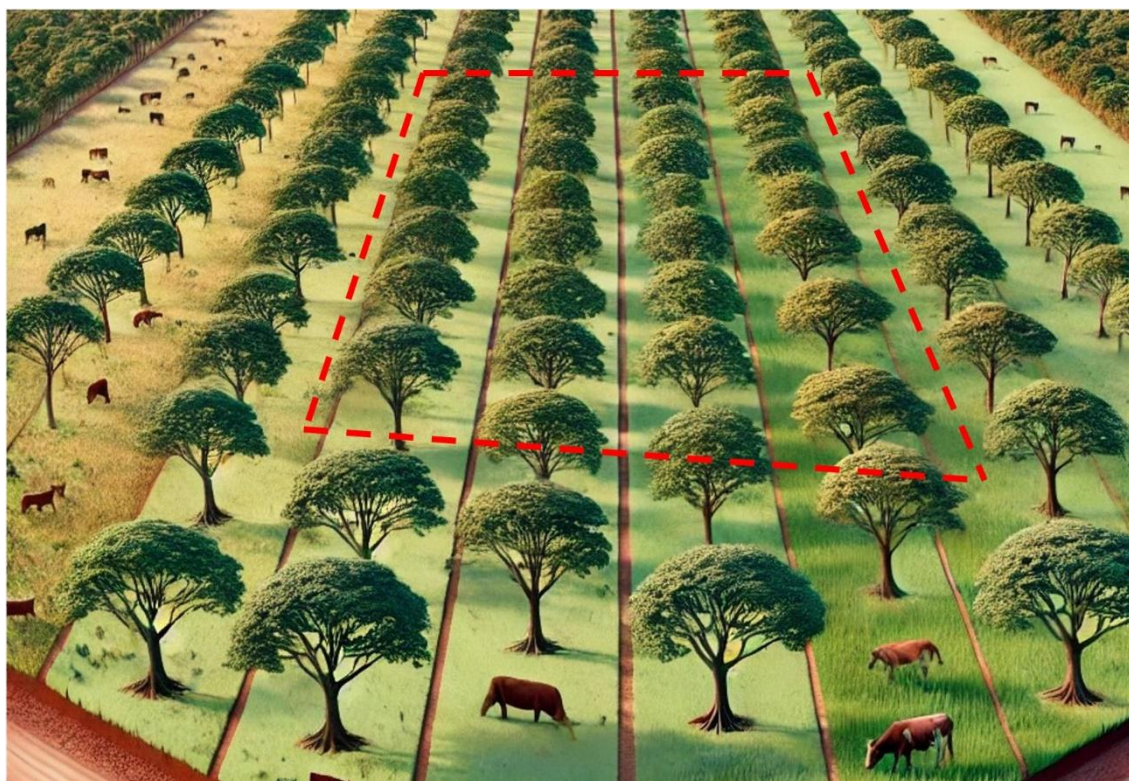
Fonte: SANTOS, 2024.

Até 2021 a população *B. excelsa* era de 200 unidades, *D. odorata* 240 unidades e *K. grandifoliola* 264 unidades. Em setembro a novembro de 2021 ocorreu o desbaste de árvores com características fenotípicas desfavoráveis para o sistema, restando 92 *B. excelsa*, 161 *D. odorata* e 181 *K. grandifoliola*.

3.2.2 Coleta de dados

Para selecionar os indivíduos que teriam os índices morfométricos calculados, desconsiderou-se as duas primeiras linhas de cada borda, a fim de evitar o chamado efeito de borda (PEREIRA et al., 2024). Desse modo, foram mensuradas 41 *B. excelsa*, 90 *D. odorata* e 78 *K. grandifoliola* (Figura 4).

Figura 4 – Esquema da disposição do componente florestal na ILPF, evidenciando as árvores que foram selecionados para análises morfométricas, dentro do pontilhado vermelho.

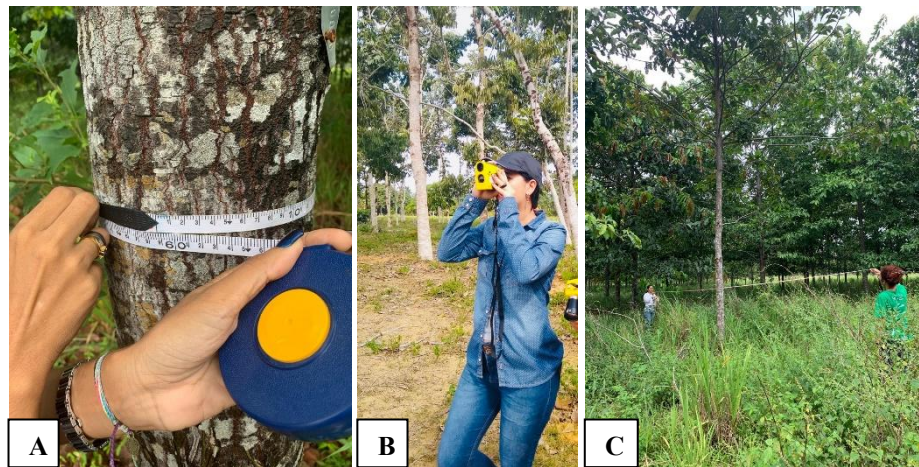


Fonte: SANTOS, 2024.

Os dados utilizados foram obtidos por meio do inventário 100%, nos componentes florestais *B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*, em 2022, com 12 anos de implantação e após o primeiro desbaste.

As variáveis mensuradas foram a circunferência à altura do peito (CAP), medido a 1,30 m do solo, posteriormente transformada para diâmetro à altura do peito (DAP); altura do total (Ht); altura do fuste (Hf) e a projeção da copa por meio das medições de quatro raios no sentido norte (N), sul (S), leste (L) e oeste (O). O CAP e as medições do sentido da copa foram obtidos com uma fita métrica e as alturas com o hipsômetro Trupulse 360 (Figura 5).

Figura 5 – Coleta das variáveis dendrométricas do componente florestal do sistema ILPF da fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos, Pará. **A.** circunferência à altura do peito. **B.** altura da árvore. **C.** medições dos raios da copa.

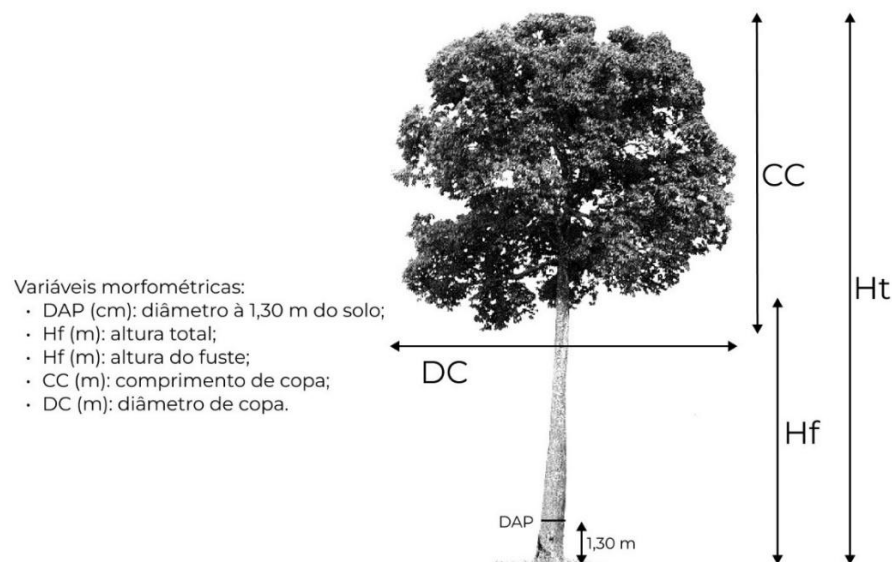


Fonte: SANTOS, 2024.

3.2.2.1 Índices morfométricos

Os índices morfométricos foram obtidos a partir das relações entre as principais variáveis da árvore (SILVA et al., 2017) (Figura 6).

Figura 6 – Modelo ilustrativo de *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl. e suas características dimensionais.



Fonte: SANTOS, 2024.

Para a análise morfométrica, calculou-se os índices presentes na Tabela 1, propostos por Condé et al. (2013).

Tabela 1 – Índices morfométricos calculados para o componente florestal presente no sistema ILPF da fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos, Pará, Brasil.

Nº	Nome	Equação	Unidade	Interpretação
Eq.1	Comprimento de Copa (CC)	$CC = Ht - Hf$	M	Distância vertical entre a base da copa e o topo da árvore.
Eq.2	Área de projeção de Copa (AC)	$AC = \frac{(\pi * (rc4)^2)}{4}$	m ²	Trata-se da superfície coberta pela projeção vertical da copa da árvore.
Eq.3	Percentagem de Copa (PC)	$PC = \frac{CC}{Ht} * 100$	%	% do tronco com copa necessária para manter a saúde vital da árvore.
Eq.4	Formal de Copa (FC)	$FC = \frac{DC}{CC}$	M	FC < 1,0: copas esbeltas; FC > 1,0: copas achatadas.
Eq.5	Grau de Esbeltez (GE)	$GE = \frac{Ht}{DAP}$	m.m ⁻¹	Demonstra a instabilidade contra o vento.
Eq.6	Índice de Abrangência (IA)	$IA = \frac{DC}{Ht}$	m.m ⁻¹	Espaço que a árvore precisa com o aumento da altura total.
Eq.7	Índice de Saliência (IS)	$IS = \frac{DC}{DAP}$	m.m ⁻¹	Vigor entre árvores com o mesmo diâmetro e revela o espaço necessário para o crescimento.
Eq.8	Incremento médio anual em altura (IMAh)	$IMAh = \frac{Ht}{idade}$	m.ano ⁻¹	Média de crescimento em altura de uma árvore ao longo de um ano. Idade: 12 anos.
Eq.9	Incremento médio anual em diâmetro (IMAd)	$IMAd = \frac{DAP}{idade}$	m.ano ⁻¹	Média de crescimento do diâmetro de uma árvore ao longo de um ano. Idade: 12 anos.

Fonte: DURLO; DENARDI, 1998; CUNHA; FINGER, 2013; SILVA et al., 2017; CARMONA et al., 2018.

3.2.3 Análise de dados

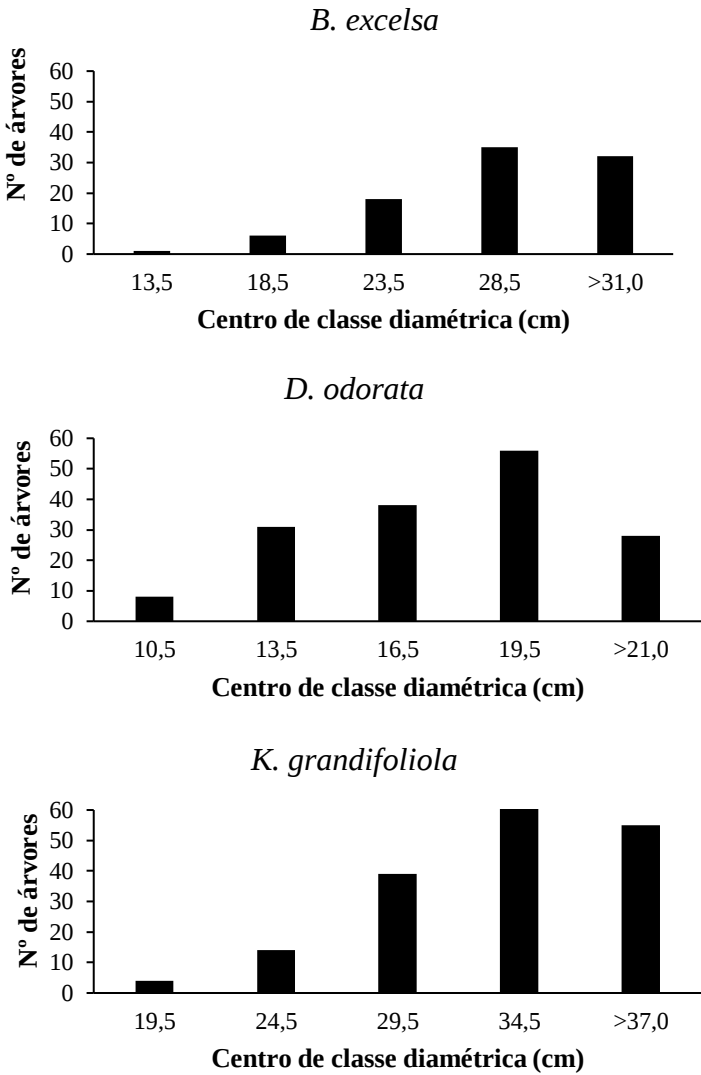
Previamente a análise dos dados foi feita a distribuição diamétrica das árvores. Os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e homogeneidade das variâncias

pelo teste de Bartlett, posterior análise de variância (ANOVA) e, quando necessário, teste de Tukey a 5% de probabilidade, por meio do software estatístico SISVAR 5.8 (FERREIRA, 2008).

3.3 Resultados e Discussão

No que se refere a distribuição diamétrica populacional dos componentes arbóreos da ILPF aos 12 anos, as espécies *B. excelsa* e *K. grandifoliola* têm árvores com diâmetros maiores, com maior concentração de árvores nos centros de classes diamétricas 28,5 cm e 34,5 cm, respectivamente. *D. odorata* apresenta uma distribuição mais equilibrada entre árvores de médio porte, com maior frequência no centro de classe 19,5 cm (Figura 7).

Figura 7 – Distribuição diamétrica das árvores de *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Fonte: SANTOS, 2024.

A análise da distribuição diamétrica fornece uma visão preliminar do crescimento florestal, permitindo estimar o estoque de madeira disponível e a biomassa acumulada, além de servir como base para decisões relacionadas a tratamentos silviculturais (GATICA-SAAVEDRA; ECHEVERRÍA; NELSON, 2017; SALES et al., 2021). Observa-se que as três espécies apresentam distribuição diamétrica com tendência para curva normal, característico de um povoamento equiâneo e mais uniforme (LIMA; LEÃO, 2013). Com maior evidência dessa configuração na espécie *D. odorata*, refletindo árvores com diâmetros uniformes.

Quanto as variáveis Ht, Hf e DAP, a espécie que apresentou maiores médias foi *K. grandifoliola*, com valores de 27,17 m, 9,26 m e 32,98 cm, respectivamente. Em contrapartida, *B. excelsa* destacou-se com maior diâmetro de copa, com média de 24,04 m. Todas as variáveis dendrométricas base para os índices morfométricos apresentaram normalidade e homogeneidade das variâncias ($p>0,05$) (Tabela 2).

Tabela 2 – Estatística descritiva da altura total (Ht), altura do fuste (Hf), diâmetro à altura do peito (DAP) e diâmetro de copa (DC) dos componentes florestais, implantados em ILPF, Mojuí dos Campos, Pará, Brasil.

Espécie	Ht (m)	Hf (m)	DAP (cm)	(DC) (m)
<i>Bertholletia excelsa</i>	21,05±3,73 b	7,76±3,34 b	28,93±4,78 b	24,04±3,29 a
<i>Dipteryx odorata</i>	12,79±2,31 c	3,06±0,59 c	17,78±3,29 c	15,92±3,12 c
<i>Khaya grandifoliola</i>	27,17±6,31 a	9,26±3,56 a	32,98±6,12 a	19,87±3,58 b
CV%	22,56	42,19	18,76	17,55
Shapiro-Wilk	0,94	0,88	0,95	0,98
Teste de Bartlett	0,76	0,58	0,61	0,78

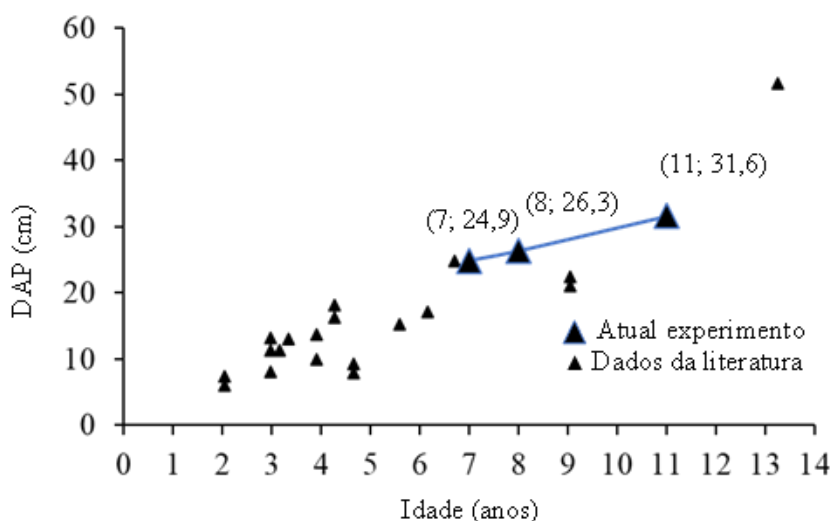
Nota: médias e desvio padrão seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV (%): coeficiente de variação. **Fonte:** SANTOS, 2024.

Khaya grandifoliola é reconhecida como a espécie de mogno africano de crescimento mais rápido em comparação com outras variedades de mogno (PINHEIRO et al., 2011). Devido à sua identificação no Brasil apenas em 2015, houve confusão com *Khaya ivorensis*, fazendo com que ambas as espécies fossem tratadas como uma só por muitos anos. Por isso, é comum encontrar na literatura estudos de variáveis morfométricas que, embora referidos a *K. ivorensis*, também podem ser aplicados a *K. grandifoliola* (FERRAZ FILHO et al., 2021).

Na Figura 8 tem-se o comparativo entre o crescimento em DAP de *K. grandifoliola* na área de estudo e outros plantios de *K. grandifoliola* ou *K. ivorensis* (FALESI; GALVÃO, 2004; RIBEIRO; FERRAZ FILHO; SCOLFORO, 2017; CARMO et al., 2018; LOPES et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2018; STOLLE et al., 2018; VIANI et al., 2020; BARBOSA et al., 2021;

SANTOS et al., 2022; CÂNDIDO et al., 2023), considerando que, em diversos trabalhos, *K. grandifoliola* foi tratado como *K. ivorensis* (FERRAZ FILHO et al., 2021).

Figura 8 – Comparação do crescimento, em diâmetro à altura do peito (DAP), de *Khaya grandifoliola* do presente estudo (triângulos com bordas azuis interligados) com outros plantios de *Khaya grandifoliola* ou *Khaya ivorensis* publicados na literatura.



Fonte: SANTOS, 2024.

Assim, pode-se inferir que o sítio do presente estudo apresenta condições edafoclimáticas que favorecem o crescimento da espécie, com destaque para o incremento em DAP. Esta conclusão baseia-se nos dados publicados por Lopes et al. (2018), referente a plantios com 7 anos, e por Cândido et al. (2023), referente a plantios com 8 anos. Além disso, destaca-se que a maioria dos dados disponíveis na literatura provém de plantio em estágios iniciais de desenvolvimento, com idades entre 2 e 5 anos. Esse contexto evidencia a relevância do estudo de *K. grandifoliola* na área atual para o avanço científico, dada a deficiência de informações sobre o desempenho da espécie em estágios mais avançados de crescimento no Brasil.

Em Monte Alegre - PA, por exemplo, *K. ivorensis* presente em consórcio com frutíferas, com idades de 10, 13 e 16 anos, apresentaram médias de Ht de 16,85 m, Hc de 6,81 m e DAP de 30,0 cm (CARMONA et al., 2018). Em Belterra-PA, *K. ivorensis* com 11 anos de idade registrou uma Ht média de 18,2 m, Hc média de 8,01 e DAP de 35,0 cm (BALONEQUE et al., 2022). Nota-se que no presente estudo, a espécie *K. grandifoliola* foi mais expressiva em altura total e de fuste.

Com base nos dados, verifica-se que os indivíduos poderiam ser destinados para o aproveitamento madeireiro, caso fosse de interesse do produtor, haja vista que o diâmetro mínimo de corte é de 20 cm para madeira bruta de *Khaya* spp., de acordo com a Instrução Normativa nº 10/2008 e, posteriormente, serem comercializados em forma de toras, mourões e postes (BRASIL, 2008).

Em sistemas agroflorestais da Amazônia Ocidental, *B. excelsa* com 12 anos de idade apresentou uma altura média total de 20,9 e DAP de 37,9 cm (COSTA et al., 2009). Observa-se que, em termos de altura, os resultados são semelhantes aos encontrados neste estudo; no entanto, o DAP foi cerca de 10 cm menor, indicando uma limitação no crescimento em diâmetro desse povoamento. Esses dados sugerem que, apesar do desenvolvimento crescente em altura, o crescimento em diâmetro pode ser influenciado por fatores específicos do sistema de cultivo ou manejo adotado.

Em sistemas agroflorestais de Porto Velho - RO, *B. excelsa* com 16,5 anos apresentou DC médio de 10,5 m, inferior ao deste estudo, mas estatisticamente superior a outras espécies do consórcio, como *Copaifera langsdorffii*, *Carapa guianensis* e *Swietenia macrophylla* (CONDÉ et al., 2013). *B. excelsa* destaca-se pelo crescimento em altura e copas extensas, requerendo espaço para se desenvolver devido à relação linear entre a largura da copa e o fuste (FARIAS et al., 2020).

Povoamento de *D. odorata*, com 10 anos, localizado em Belterra - PA, em histórico de cultivo semelhante à desse estudo, consorciado durante dois anos com milho (*Zea mays*), e posteriormente abandonado, apresentou indivíduos com médias de Ht de 7,0 m, Hc de 1,9 m, DAP de 8,8 cm e DC de 4,1 cm (SILVA et al., 2020). Em ambos os cenários, os valores de crescimento poderiam ter sido potencializados com a correção e adubação do solo ao longo de todo o período de cultivo, não apenas na implantação, e com a aplicação de tratamentos silviculturais que favorecessem o desenvolvimento adequado das árvores.

Contudo, *D. odorata* apesar de apresentar menores valores de variáveis morfométricas, foi o componente florestal que apresentou menor desvio padrão, o que configura um plantio mais homogêneo.

Observa-se que nos índices morfométricos relacionados a copa, *K. grandifoliola* exibe copas mais altas, com comprimento de copa (CC) médio de 17,91 m, *B. excelsa* tem copas que ocupam maiores áreas, com área de projeção de copa (AC) média de 462,13 m² e formal de copa (FC) de 1,94 m, e *D. odorata* apresentou maior percentagem de copa (PC), com 75,49% (Tabela 3).

Tabela 3 – Médias e desvio padrão do comprimento de copa (CC), área de projeção de copa (AC), percentual de copa (PC), formal de copa (FC) das árvores presentes em sistema ILPF no município de Mojuí dos Campos, Pará.

Espécie	CC (m)	AC (m ²)	PC (%)	FC (m)
<i>Bertholletia excelsa</i>	13,29±4,04	462,13±121,63	63,02±14,58	1,94±0,52
<i>Dipteryx odorata</i>	9,73±2,22	206,62±78,22	75,49±5,67	1,69±0,38
<i>Khaya grandifoliola</i>	17,91±6,49	320,23±114,84	64,88±14,59	1,30±0,78

Fonte: SANTOS, 2024.

Os índices morfométricos da copa são atributos que definem cada espécie (CISNEROS; MOGLIA; ÁLVAREZ, 2019). A copa desempenha uma função vital para a planta, pois é responsável pela fotossíntese por meio da captação de luz solar. Dessa forma, o tamanho da copa está diretamente relacionado ao crescimento da planta e a produção de biomassa (ELOY et al., 2012).

O comprimento de copa (CC) é influenciado pela competição por recursos como água, nutrientes e luz (VERA et al., 2022). Condé et al. (2013) analisaram variações morfométricas de diversas espécies florestais, incluindo *Swietenia macrophylla* (mogno brasileiro) e *Bertholletia excelsa*, e observaram que o CC de *S. macrophylla* (7,87 m) foi maior do que o de *B. excelsa* (6,91 m).

Os elevados valores da área de projeção de copa (AC) e formal de copa (FC) para *B. excelsa* indicam que a espécie desenvolve copas maiores, mais achatadas e mais vigorosas, portanto, exigem maiores espaçamentos iniciais do que os outros componentes florestais em estudo. Oliveira et al. (2021) indicam espaçamentos a partir de 5 m x 5 m e desbastes antes dos 20 anos, assim as árvores terão maior potencial para produção madeireira e de frutos.

Altos índices morfométricos de *B. excelsa* também foram observados por Tonini e Arco-Verde (2005), que registraram, aos 7 anos, valores de AC de 35,60 m² e FC de 0,86 m para essa espécie, comparados com outras como *Carapa guianensis* (AC = 10,40 m², FC = 0,30 m), *Tabebuia avellanedae* (AC = 1,86 m², FC = 0,73 m) e *Hymenaea courbaril* (AC = 6,60 m², FC = 0,79 m). Esses resultados reforçam a necessidade de maiores espaçamentos para *B. excelsa* em relação a outras espécies de grande porte.

O índice formal de copa (FC) de *B. excelsa* encontrado neste estudo, de 1,94 m, foi superior ao observado por Dionisio et al. (2017), que relata 0,56 m para árvores solitárias no sudeste de Roraima, e por Tonini e Arco-Verde (2005), que documentaram 0,86 m em um plantio homogêneo de 7 anos em Cantá - RR. Condé et al. (2013) também registraram um valor menor, de 1,66 m, em Rondônia. Esse índice é relevante para a produção de sementes, uma vez

que a forma da copa influencia diretamente na produção; copas mais altas tendem a ser mais produtivas (TONINI; KAMINSKI; COSTA, 2008).

Além disso, árvores com copas robustas são capazes de modificar o microclima da área, proporcionando conforto térmico e sombra para animais que utilizam o local para pastagem ou descanso (MAGALHÃES et al., 2020). No presente estudo foi possível observar esse comportamento dos bovinos de corte da área de estudo, apesar do pasto não estar mais recebendo cuidados adequados, os animais ainda se direcionavam para aproveitar a sombra das árvores.

Embora a espécie *Dipteryx odorata* tenha apresentado menores valores para as variáveis dendrométricas DAP, HT e DC, destacou-se pela alta percentagem de copa. Esse resultado indica a vitalidade das árvores, pois a maior porcentagem de copa está associada a uma maior capacidade produtiva (ROMAN; BRESSAN; DURLO, 2009). Essa característica é particularmente relevante para espécies florestais não madeireiras, já que promove o desenvolvimento e o aproveitamento econômico da planta.

Em um plantio homogêneo de *D. odorata* com 10 anos de idade, Silva et al. (2020) registraram um PC de 62,9%, valor inferior ao observado no presente estudo. Essa comparação sugere que as árvores de *D. odorata* no sistema ILPF têm copas vigorosas e com potencial para uma produção eficiente.

No que se refere aos índices morfométricos que levam em consideração do diâmetro de copa, os dados obtidos para *D. odorata* foram mais expressivos, sendo índice de abrangência (IA) de 1,26 e índice de saliência (IS) de 90,27. No que diz respeito à relação entre a altura total e o diâmetro da árvore, o grau de esbeltez (GE) foi mais elevado em *Khaya grandifoliola*, apresentando uma média de 84,11 (Tabela 4).

Tabela 4 – Médias, desvio padrão e coeficiente de variação do grau de esbeltez (GE), índice de abrangência (IA) e índice de saliência (IS) das árvores presentes em sistema ILPF no município de Mojuí dos Campos, Pará.

Espécie	GE	IA	IS
<i>Bertholletia excelsa</i>	73,63±12,53	1,16±0,18	84,01±10,17
<i>Dipteryx odorata</i>	72,67±10,54	1,26±0,24	90,27±13,35
<i>Khaya grandifoliola</i>	84,11±20,96	0,76±0,20	61,16±10,50

Fonte: SANTOS, 2024.

O grau de esbeltez (GE) foi mais elevado em *K. grandifoliola*, indicando que essa espécie está crescendo mais em altura do que em diâmetro. Esse resultado também sugere maior suscetibilidade a intempéries, como ventos fortes, aumentando o risco de quebra do fuste e da

copa. Além disso, o GE indica a competição por luz entre as árvores, o que pode retardar o crescimento em diâmetro e indicar a necessidade de desbaste (COSTA et al., 2009; LANZARIN, 2016).

Em um sistema agroflorestal no município de Monte Alegre - PA, árvores de *K. ivorensis* com idades entre 12 e 16 anos apresentaram um GE médio de 63,1. Apesar de ser menor do que os obtidos neste estudo, foi considerado alto, alertando para cautela quanto à utilização dessa espécie em bordas de sistemas agroflorestais devido à sua fragilidade ao vento (CARMONA et al., 2018).

O índice de abrangência (IA) revela a necessidade de mais espaço conforme o aumento em altura, e o índice de saliência (IS) expressa baixa taxa de crescimento da espécie, pois espécies que apresentam valores de IS maiores do que 25, apresentam característica de lento crescimento (DAWKINS, 1963; KLEIN et al., 2017). No presente estudo, todas as espécies consideradas apresentaram IS superior a 25, o que configura um crescimento mais lento em áreas de recuperação em comparação ao habitat natural, embora estudos mais detalhados sejam necessários para confirmar essa observação.

O índice de saliência (IS) de *D. odorata* e *B. excelsa* demonstra que as copas são 90 e 84 vezes maiores que o DAP, respectivamente. Em um estudo feito somente com *D. odorata* em diversos tipos de consórcio e com plantio homogêneo, notou-se que seu crescimento apresentava taxas mais expressivas, visto que os índices de saliência (IS) foram menores, entre 39,5 e 59,0 (SILVA et al., 2020). Para *B. excelsa*, com 16,5 anos, em sistemas agroflorestais, foi obtido IS de 29,83 (CONDÉ et al., 2013).

Quanto aos valores de incremento médio, observa-se que *K. grandifoliola* foi a espécie com maior IMA_h ($2,26 \text{ m.ano}^{-1}$) e IMA_d ($2,75 \text{ cm. ano}^{-1}$) (Tabela 5).

Tabela 5 – Médias e desvio padrão e coeficiente de variação do incremento médio anual da altura (IMA_h), em m.ano^{-1} , e de incremento médio anual em diâmetro (IMA_d), em cm.ano^{-1} , para os componentes florestais, implantadas em ILPF no município de Mojuí dos Campos, Pará, Brasil.

Espécie	IMA_h	IMA_d
<i>Bertholletia excelsa</i>	$1,75 \pm 0,31 \text{ b}$	$2,41 \pm 0,40 \text{ b}$
<i>Dipteryx odorata</i>	$1,06 \pm 0,19 \text{ c}$	$1,48 \pm 0,27 \text{ c}$
<i>Khaya grandifoliola</i>	$2,26 \pm 0,53 \text{ a}$	$2,75 \pm 0,51 \text{ a}$
CV (%)	22,56	18,76

Nota: médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV (%): coeficiente de variação. **Fonte:** SANTOS, 2024.

Em geral, o gênero *Khaya* se destaca em IMA_h e IMA_d quando comparado as outras espécies florestais, como foi verificado por Baloneque et al. (2022), quando observaram a notoriedade de *K. ivorensis* diante de *Carapa guianensis*, *Tectona grandis* e *Dipteryx* sp., com 11 anos, ao apresentar IMA_h de $1,66 \text{ m.ano}^{-1}$ e IMA_d de $3,2 \text{ cm.ano}^{-1}$.

Na área experimental da Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus - AM, o IMA_h de *B. excelsa* presente em sistema agroflorestal multiestratificado, aos 11 anos, foi de $1,74 \text{ m.ano}^{-1}$ e IMA_d de $3,16 \text{ cm.ano}^{-1}$ (COSTA et al., 2009). O resultado para o IMA_h foi semelhante ao do povoamento estudado neste trabalho, e mostra como a espécie está se desenvolvendo melhor em altura do que em diâmetro, haja vista que o IMA_d foi menor do que o encontrado por Costa et al. (2009).

Em Belterra - PA, *Dipteryx* sp. teve IMA_h de $1,31 \text{ m.ano}^{-1}$ e IMA_d de $1,5 \text{ cm.ano}^{-1}$, no décimo primeiro ano (BALONEQUE et al., 2022), sendo o resultado do incremento em diâmetro muito próximo ao encontrado, haja a vista as condições de sítio serem semelhantes e a idade ter diferença de apenas um ano.

3.4 Conclusão

Em termos de distribuição populacional, *Bertholletia excelsa* e *Khaya grandifoliola* têm populações mais maduras, com predominância de árvores maiores, enquanto *Dipteryx odorata* apresenta uma distribuição mais equilibrada entre árvores jovens e adultas.

B. excelsa foi a espécie que apresentou copas mais expressivas e vigorosas, com maiores diâmetro de copa (DC), área de copa (AC) e formal de copa (FC), portanto, deve-se considerar espaçamentos amplos, devido às grandes copas e ao porte elevado em sua utilização em sistema ILPF.

D. odorata foi o componente florestal com menor desenvolvimento dendrométrico, entretanto, pode-se afirmar que é o mais homogêneo. As árvores menores e mais esbeltas permitem maior penetração de luz até o solo, o que pode beneficiar a pastagem na ILPF.

Khaya grandifoliola é a espécie com as árvores mais altas e robustas, com copas grandes e projeção de copa extensa, o que pode ser um desafio em termos de competição por luz em sistemas integrados. Desse modo, um espaçamento maior do que o do presente estudo é recomendado, além de podas regulares para garantir a penetração de luz suficiente para as atividades e pastagens subjacentes. Manter as copas em tamanho controlado melhora o microclima para os animais e para as culturas agrícolas.

Além da produção madeireira, as espécies oferecem produtos não madeireiros de alto valor agregado, como os frutos e sementes, além dos serviços ambientais. A diversificação econômica no sistema ILPF pode incluir uma colheita sustentável desses produtos, maximizando a geração de renda sem comprometer a sustentabilidade do sistema.

Referências Bibliográficas

ASSMAN, E. **Waldertargskunde**. Muchen: Bayr. Landw, 1961. 490 p.

BALONEQUE, D. D.; PAULETTO, D.; LOPES, L. S. S.; RODE, R.; OLIVEIRA, T. G. S. Variáveis morfométricas de quatro espécies florestais em sistema silvipastoril no município de Belterra, Pará. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 3, p. 1-13, 2022.

BARBOSA, G. P.; NOGUEIRA, G. S.; OLIVEIRA, M. L. R.; BRUZINGA, J. S.; CASTRO, R. V. O.; DUTRA, G. C. Crescimento inicial de espécies florestais para fins de uso múltiplo na região central de Minas Gerais. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 25256-25274, 2021.

BRASIL. Instrução Normativa SEMA nº 10 de 16/05/2008. Normas e procedimentos para o Cadastro de Exploradores e Consumidores de produtos Florestais do Estado do Pará – CEPFOP-PA e do Sistema de Comercialização e Transporte dos produtos Florestais do Estado do Pará – SISFLORA-PA e outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2008. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=147663>. Acesso em: 01 nov. 2023.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Lei nº 12.805/2013. Institui a Política Nacional de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e altera a Lei nº 8.171, de 17 de janeiro de 1991. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2013. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Lei/L12805.htm. Acesso em: 01 nov. 2023.

BURGUER, H. Baumkrone und zuwachs in zwei hiebsreifen fichtenbestanden. Mitteilungen der Schweizerrischen. **Anstalt fur das Forstliche Versuchswesen**, v. 21, n. 21, p. 147-176, 1939.

CÂNDIDO, A. C. T. F.; MARTORANO, L. G.; CÂNDIDO, B. U. F.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C. T. S.; LISBOA, L. S. S.; FERNANDES, P. C. C.; SILVA, A. R.; DIAS-FILHO, M. B.; BELDINI, T. P. Infrared Thermal Profiles in Silvopastoral and Full-Sun Pastures in the Eastern Amazon, Brazil. **Forests**, v. 14, n. 7, p. 1463, 2023.

CARMO, R. F.; NAKAJIMA, N. Y.; SILVA, S. A.; MATTAR, E. A. Desenvolvimento inicial de *Khaya ivorensis* em plantio irrigado. **Nativa**, v. 6, n. 2, p. 159-164, 2018.

CARMONA, I. N.; AQUINO, M. G. C.; ROCHA, D. I. S.; SILVA, J. J. N.; FICAGNA, A. G.; BALONEQUE, D. D.; OTAKE, M. Y. F.; PAULETTO, D. Variáveis morfométricas de três espécies florestais em Sistema agroflorestal. **Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 131-144, 2018.

CISNEROS, A. B.; MOGLIA, J. G.; ÁLVAREZ, J. A. Morfometria de copa em *Prosopis alba* Griseb. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 863-884, 2019.

CONDÉ, T. M.; LIMA, M. L. M.; LIMA NETO, E. M.; TONINI, H. Equações morfométricas das espécies andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) e castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) em sistemas agroflorestais no município de Porto Velho, Rondônia. **Ambiente: Gestão e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, 2012.

CONDÉ, T. M.; LIMA, M. L. M.; LIMA NETO, E. M.; TONINI, H. Morfometria de quatro espécies florestais em sistemas agroflorestais no município de Porto Velho, Rondônia. **Revista Agro@mbiente**, v. 7, n. 1, p. 18-27, 2013.

COSTA, J. R.; CASTRO, A. B. C.; WANDELLI, E. V.; CORAL, S. C. T.; SOUZA, S. A. G. Aspectos silviculturais da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 39, n. 4, p. 843-850, 2009.

COSTA, D. C.; MARTORANO, L. G.; MORAES, J. R. S. C.; LISBOA, L. S. S.; STOLF, R. Temporal dynamics of the water footprint of soybean crops in a grain hub in western Pará, Amazon. **Environment and Water Journal**, v. 13, n. 5, e2051, 2018.

CUNHA, T. A.; FINGER, C. A. G. Competição assimétrica e o incremento diamétrico de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Amazônia Ocidental. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 1, p. 9-18, 2013.

DAWKINS, H. C. Crow diameters: their relation to bole diameter in tropical Forest trees. **Commonw Forest Review**, v. 42, n. 4, p. 318-333, 1963.

DIONISIO, L. F. S.; CONDÉ, T. M.; GOMES, J. P.; MARTINS, W. B. R.; SILVA, M. W.; SILVA, M. T. Caracterização morfométrica de árvores solitárias de *Bertholletia excelsa* H.B.K. no sudeste de Roraima. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 11, n. 2, p. 163-173, 2017.

DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência florestal**, v. 8, n. 1, p. 55-66, 1998.

DURLO, M. A. Relações morfométricas para *Cabralea canjerana* (Well.) Mart. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 1, p. 141-149, 2001.

ELOY, E.; CARON, B. O.; SOUZA, V. Q.; BEHLING, A.; ELLI, E. F. Influência do espaçamento na altura e diâmetro. **Centro Científico Conhecer**, v. 8, n. 14, p. 675-682, 2012.

FALESI, I. C.; GALEÃO, R. R. Recuperação de áreas antropizadas da Mesorregião nordeste paraense por meio de sistemas agroflorestais. In: MULLER, M. W.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BRANDÃO, I. C. F. L.; SERÔDIO, M. H. C. F. **Sistemas agroflorestais, tendência da agricultura ecológica nos trópicos: sustento da vida e sustento de vida**. CEPLAC, Ilhéus, BA: Sociedade Brasileira de Sistemas Agroflorestais, 2004, 292 p.

FARIAS, C. B. M.; ARROLHO, A.; DA SILVA, M. C. M.; CRUZ, R. R.; RAMOS, L.P.N.; SOUZA, S. A. M. Avaliação morfológica de *Bertholletia excelsa* comparando diferentes métodos. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, n. 8, p. 35-42, 2020.

FERRAZ FILHO, A. C.; RIBEIRO, A.; BOUKA, G. U. D.; FRANK JÚNIOR, M.; TERRA, G. Highlights of African mahogany plantations in Brazil. **Forest and Environment**, v. 28, n.3, 2021.

FERREIRA, D. F. **Software estatístico SISVAR versão 5.8**. CNPQ: Universidade Federal de Lavras, 2008.

FREIRE, D. N.; CAVICHIOLI, F. A. Integração lavoura pecuária floresta (ILPF): uma estratégia tecnológica para o agronegócio. **Interface Tecnológica**, v. 19, n. 2, p. 680-690, 2022.

GATICA-SAAVEDRA, P.; ECHEVERRÍA, C.; NELSON, C. R. Ecological Indicators for Assessing Ecological Success of Forest Restoration: A World Review. **Restoration Ecology**, v. 25, 850-857, 2017.

KLEIN, D. R.; HESS, A. F.; KREFTA, S. M.; VIEIRA FILHO, M. D. H.; CIARNOSCKI, L. D.; COSTA, E. A. Relações morfométricas para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Santa Catarina. **Floresta**, v. 47, n. 4, p. 501-512, 2017.

KÖPPEN, W. O sistema geográfico do clima. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Eds.), **Handbuch der Klimatologie**, v. 1 (Parte C). Berlin: Gebrüder Borntraeger. 1936.

LAMEIRA, M. K. S.; SILVA, H. K. M.; GOMES, K. M. A.; CÂNDIDO, A. C. T. F.; MARTORANO, L. G.; SILVA-RIBEIRO, R. B.; SILVA, A. R.; GAMA, J. R. V. Capacidade produtiva de *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. em um sistema de produção de pecuária integrada no Baixo Amazonas, Brasil. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 19, n. 44, p. 56-65, 2022.

LANZARIN, K. **Relações Morfométricas e Potencial de Manejo de *Maclura tinctoria* (L.) D. Don Ex. Steud em Formações Secundárias do Noroeste do rio Grande do Sul**. 2016. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria - RS, 2016.

LIMA, J. P. C.; LEÃO, J. R. A. Dinâmica de crescimento e distribuição diamétrica de fragmentos de florestas nativa e plantada na Amazônia Sul Ocidental. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 1, p.70-79, 2013.

LOPES, L. S. S.; RODE, R.; PAULETTO, D.; BALONEQUE, D. D.; SILVA, A. R.; SANTOS, K. N. F. Ajuste de modelos de taper e sortimento de toras de mogno africano em sistemas agroflorestais em Belterra, Pará. **Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 18-28, 2018.

LOPES, L. C. A.; SANTOS, A. J. M.; BACKES, C.; SILVA, L. L.; MAGALHÃES, A. F. Desenvolvimento florestal em sistema integrado lavoura-pecuária-floresta. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n.11, p. 7-17, 2021.

MAGALHÃES, C. A.; ZOLIN, C. A.; LULU, J.; LOPES, L. B.; FURTINI, I. V.; VENDRUSCULO, L. G.; ZAIATZ, A. P. S. R.; PEREIRA, B. C.; PEZZOPANE, J. R. M. Improvement of thermal comfort indices in agroforestry systems in the southern Brazilian amazon. **Journal of Thermal Biology**, v. 91, p. 102636, 2020.

MARTORANO, L. G.; PEREIRA, L. C.; NECHET, D. Climate typology of the state of Pará – Adaptation of the Koppen method. **Bulletin of Theoretical Geography**, v. 23, 45-46. 1993.

MARTORANO, L. G.; SOARES, W. B.; MORAES, J. R. S. C.; NASCIMENTO, W.; APARECIDO, L. E. O.; VILLA, P. M. Climatology of Air Temperature in Belterra: Thermal Regulation Ecosystem Services Provided by the Tapajós National Forest in the Amazon. **Brazilian Journal of Meteorology**, v. 36, n. 2, p. 327-337. 2021.

OLIVEIRA, X. M.; RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; MAYRINCK, R. C.; LIMA, R. R.; SCOLFORO, J. R. S. Volume equations for *Khaya ivorensis* A. Chev. plantations in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 4, p. 3285-3298, 2018.

OLIVEIRA, R. G de; SOUZA, A. S de; SANTOS, V. A. H. F. dos; LIMA, R. M. B. de; FERREIRA, M. J. Efeitos de longo prazo do espaçamento entre plantas no crescimento e morfometria de *Bertholletia excelsa*. **Acta Amazonica**, v. 5, n.13, p. 181-190, 2021.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. de; CORREA, J. R. V. **Aptidão agrícola dos solos de Município de Belterra, Estado do Pará**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, Documentos 91, 2001. 21 p.

PEREIRA, A. L. L.; DE PAULA, A.; BARRETO-GARCIAI, P. B.; DE BRITO, A. C. Efeito de borda sobre a florística e estrutura em Floresta Estacional Semidecidual no Semiárido. **Ciência Florestal**, v. 34, n. 1, e72064, p. 1-18, 2024.

PINHEIRO, A. L.; COUTO, L.; PINHEIRO, D. T.; BRUNETTA, J. M. F. C. **Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilização dos mognos-africanos** (*Khaya* spp.). Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura, 2011. 102 p.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. O cultivo do mogno africano (*Khaya* spp.) e o crescimento da atividade no Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e00076814, 2017.

RODRIGUES, L. M.; TEODORO, A. G.; SANTOS, A. J. M.; BACKES, C.; ROCHA, J. H. T.; GIONGO, P. R.; DOS SANTOS, Y. L. A. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: Interação entre Componentes e Sustentabilidade do Sistema. **Archivos de Zootecnia**, v. 68, n. 263, p. 448-455, 2019.

ROMAN, M.; BRESSAN, D. A.; DURLO, M. A. Variáveis morfométricas e relações interdimensionais para *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. Ex steud. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 4, p. 473-480, 2009.

SALES, A.; SIVIERO, M. A.; VIEIRA, S. B.; YARED, J. A. G.; RUSCHEL, A. R.; SILVA, M. L. da. Sistema de Manejo Silvicultural Aplicado a Florestas Exploradas na Amazônia brasileira: um estudo de caso de adaptação de técnicas para aumento da produtividade e diversidade de espécies. **Forestry Diversity**, v. 13, n. 509, p. 3-16, 2021.

SANTOS, F. M.; TERRA, G.; MONTE, M. A.; CHAER, G. M. Crescimento, rendimento e forma do caule de mognos africanos jovens (*Khaya* spp.) em plantações de espécies mistas e sistemas agroflorestais sucessoriais. **New Forests**, v. 53, p. 181-202, 2022.

SILVA, F. A.; FORTES, F. O; RIVA, D.; SCHORR, L. P. B. Caracterização de índices morfométricos para *Araucaria angustifolia* plantada na Região Norte do Rio Grande do Sul. **Advances in Forestry Science**, v. 4, n. 3, p. 143-146, 2017.

SILVA, J. C. N.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; DANTAS, E. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S. Aggregation, carbon, and total soil nitrogen in crop-livestock-forest integration in the Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 12, p. 837-842, 2018.

SILVA, J. A. G.; PAULETTO, D.; SILVA, A. F.; CARVALHO, C. S. S.; NASCIMENTO, H. G. N. Morfometria de plantios de *Dipteryx odorata* Aubl. Willd (Cumaru) no Oeste do Pará. **Advances Forestry Science**, v. 7, n. 3, p. 1171-1180, 2020.

SILVA, A. R.; RODRIGUES FILHO, J. A.; CARVALHO, E. J. M.; SANTIAGO, A. V.; VELOSO, C. A. C.; MARTINEZ, G. B. Estoque de carbono e mitigação de metano produzido por bovinos em sistema integração pecuária-floresta (IPF) com eucalipto no Sudeste Paraense. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 39997-40016, 2021.

STOLLE, L.; VELOZO, D. R.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, R. C.; BEUTLING, A. Modelos hipsométricos para um povoamento jovem de *Khaya ivorensis* A. Chev. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 2, p. 231-236, 2018.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 7, p. 633-638, 2005.

TONINI, H.; KAMINSKI, P. E.; COSTA, P. Relação da produção de sementes de castanha do Brasil com características morfométricas da copa e índices de competição. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1509-1516, 2008.

TONUCCI, R. G. **Sistemas integrados**: uma nova opção de produção agropecuária sustentável no Semiárido. Brasília, DF: Embrapa, 2023. 20 p.

VERA, D. E.; LAURA, V. A.; FERREIRA, A. D.; COUTO, A. M. Crescimento e forma do eucalipto em função da densidade de plantio. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 1, p. 504-522, 2022.

VIANI, R. A. G.; MORAIS, J. P. G. DE.; DOMENE, F.; EUGÊNIO, E. R.; CAMPANA, M.; LATARINI NETO, E.; OLIVEIRA, A. C. C. DE. Bark-stripping of African mahogany trees (*Khaya* spp.) by cattle in silvopastoral systems in Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 94, p. 2385-2390, 2020.

4 CAPÍTULO II

TEOR DE CARBONO EM FOLHAS, GALHOS E FUSTES DE *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl., *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. e *Khaya grandifoliola* C. DC. EM SISTEMA DE PRODUÇÃO INTEGRADO NA AMAZÔNIA³

³ O capítulo encontra-se de acordo com o Guia para elaboração e apresentação da produção acadêmica da Ufopa. Disponível em: <http://ufopa.edu.br/sibi/servicos-e-produtos/guia-de-normalizacao/>; e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

TEOR DE CARBONO EM FOLHAS, GALHOS E FUSTES DE *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl., *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. e *Khaya grandifoliola* C. DC. EM SISTEMA DE PRODUÇÃO INTEGRADO NA AMAZÔNIA

RESUMO: A intervenção silvicultural possibilita a quantificação do teor de carbono em diferentes espécies florestais, fornecendo as amostras destrutivas a oportunidade da identificação de indicadores passíveis de certificação sobre os serviços ambientais prestados pelo sistema Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). O objetivo foi determinar o teor de carbono em diferentes compartimentos das espécies *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*, a partir do manejo silvicultural em sistema ILPF na Amazônia Oriental. O sistema estava com 11 anos de implantação na Fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos, Pará, e os talhões de cada espécie foram implantados em oito linhas, com espaçamento de 7 m x 5 m. Os talhões são separados por uma distância de 166 m, onde nos primeiros anos foram implantadas culturas anuais e, após o pleno desenvolvimento das espécies florestais passou a ser mantido apenas a espécie forrageira para pastagem de animais, sendo a mesma forrageira nos talhões no entorno, onde os animais pastam a pleno sol. O teor de carbono foi obtido a partir do desbaste de 10 árvores por espécie, totalizando 30 amostras, as quais foram transportadas ao Laboratório de Tecnologia da Madeira (LTM), da Universidade Federal do Oeste do Pará (Ufopa), para análise elementar. Foram tabulados os dados em planilhas eletrônicas (Microsoft Excel 2013) para posterior análises estatísticas utilizando o software SISVAR (versão 5.8). Foram aplicados testes de normalidade (Shapiro-Wilk), análise de variância (ANOVA) e teste de agrupamento de Scott-Knott, com nível de significância de 5%. Os resultados indicaram diferenças significativas no teor de carbono entre os compartimentos das espécies avaliadas. *B. excelsa* apresentou maior teor de carbono nas folhas, com média de 50,68%, enquanto em *D. odorata*, o teor médio foi de 52,14% nas folhas. *K. grandifoliola* apresentou o maior teor de carbono no fuste, com média de 49,01%. As diferenças identificadas ressaltam a importância de uma quantificação detalhada do teor de carbono em cada compartimento para avaliar o desempenho do sistema e possibilitar a adoção de estratégia de valoração ambiental, bem como para possibilitar a certificação e valoração em política de pagamento por serviços ambientais prestados pelo ILPF na propriedade rural. Os resultados expressam as especificidades de cada espécie e a importância dos valores exatos para a monetização dos serviços ambientais prestados pelo ILPF, reforçando a importância do componente florestal na regulação do clima e na conservação das conectividades ecológicas em sistemas produtivos na Amazônia brasileira.

Palavras-chave: Espécies florestais. Compartimentos vegetais. Análise elementar. Sistema de produção integrada.

ABSTRACT: Silvicultural intervention makes it possible to quantify the carbon content in different forest species, providing destructive samples with the opportunity to identify indicators capable of certification on the environmental services provided by the Integration-Crop-Livestock-Forest (ILPF) system. The objective was to determine the carbon content in different compartments of the species *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata*, and *Khaya grandifoliola*, following silvicultural management in an ICLF system in the Eastern Amazon. The system, established 11 years ago at Fazenda Nossa Senhora de Aparecida in Mojuí dos Campos, Pará, included plots for each species arranged in eight rows with 7 m x 5 m spacing. The plots were separated by a distance of 166 m, where annual crops were initially planted. Once the forest species fully developed, only forage grass for animal grazing was maintained, both in the plots and their surroundings, where animals graze in full sun. Carbon content was assessed through the thinning of 10 trees per species, totaling 30 samples, which were

transported to the Wood Technology Laboratory (LTM) at the Federal University of Western Pará (Ufopa) for elemental analysis. Data were tabulated using electronic spreadsheets (Microsoft Excel 2013) and analyzed statistically with SISVAR software (version 5.8). Statistical tests included normality (Shapiro-Wilk), analysis of variance (ANOVA), and Scott-Knott clustering tests, with a 5% significance level. The results revealed significant differences in carbon content among the compartments of the evaluated species. In *B. excelsa*, the highest carbon content was found in the leaves, with an average of 50.68%, whereas in *D. odorata*, the average carbon content was 52.14% in the leaves. *K. grandifoliola* exhibited the highest carbon content in the trunk, with an average of 49.01%. The differences identified highlight the importance of a detailed quantification of the carbon content in each compartment to evaluate the system's performance and enable the adoption of an environmental valuation strategy, as well as to enable certification and valuation in payment policy for environmental services provided by the ILPF on rural property. The results underscore the specific characteristics of each species and the importance of precise values for monetizing the environmental services provided by the ICLF system. This reinforces the significance of the forest component in climate regulation and the conservation of ecological connectivity in productive systems within the Brazilian Amazon.

Keywords: Forest species. Plant compartments. Elemental analysis. Integrated production system.

4.1 Introdução

O desmatamento na Amazônia no período de 2006 a 2019 foi estimado em 194.058 km², destacando que os impactos nessa área incluem a perda de biodiversidade e mudanças nos estoques de carbono. A transferência afeta o balanço de dióxido de carbono (CO₂), importante gás de efeito de estufa (GEE), e compromete a dinâmica do sistema climático global (ASSIS et al., 2022). No Brasil, em 2020, foram emitidos 2,16 bilhões de toneladas de CO₂, contra 1,97 bilhão de toneladas em 2019 (POTENZA et al., 2021).

Entre as alternativas de mitigação dos gases de efeito estufa (GEE) destacam-se o sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), que combina em uma mesma área, atividades agrícolas, pecuárias e florestais, seja de forma consorciada, em sucessão ou rotacionada (BRASIL, 2013). Os sistemas ILPF promovem benefícios como recuperação de áreas degradadas, melhoria da fertilidade do solo, aumento da biodiversidade e fornecem serviços ambientais como a captura e fixação de carbono na biomassa das árvores (MONTEIRO et al., 2024).

O Brasil distribuiu normas para a elaboração de Planos Setoriais de Mitigação de Mudanças Climáticas, através do Decreto nº 11.075, determinando ferramentas como o Sinare (Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa), para registros de pegadas de carbono de produtos, processos e atividades, do estoque de carbono do tecido nativo,

no solo e em sistemas marinhos. A criação destas normas facilita o comércio de carbono, principalmente para médios e pequenos produtores rurais (BRASIL, 2022).

Para a elaboração de projetos ambientais que visam quantificar o sequestro de carbono, é necessário o conhecimento do teor de carbono de cada espécie envolvida no projeto (VIEIRA et al., 2009), visto que geralmente as estimativas de carbono armazenado na biomassa florestal são calculadas pela multiplicação do valor da biomassa encontrado por um teor de carbono (SILVA et al. 2022). Quando não tem o valor exato do teor de carbono, recomenda-se assumir 50% (IPCC, 2006), o que pode induzir graves erros de estimativas.

Porém, o estoque de carbono na biomassa das plantas e as taxas de assimilação do carbono tendem a variar de acordo com a fisiomorfologia de cada espécie, que afeta as interações no sistema solo-planta-atmosfera e reflete na produção de matéria seca em resposta ao balanço de carbono (DALLAGNOL et al., 2011).

Há lacunas nos estudos a respeito do estoque de biomassa das árvores, principalmente com referência aos plantios de espécies que estão presentes em sistemas integrados na Amazônia. Os estudos existentes demonstram grandes variações nos estoques de carbono armazenados por árvores (SAIDELLES et al., 2009). No que tange ao teor de carbono, apesar de haver variação, os valores são menos discrepantes, porém, influenciam diretamente no estoque de carbono (MENG et al., 2021). A variação do teor de carbono pode ocorrer entre espécies diferentes, espécies iguais sob condições distintas, e dentro dos compartimentos de uma mesma espécie (WATZLAWICK; SANQUETTA; ARCE, 2003).

Portanto, evidencia-se a necessidade de quantificar o teor de carbono das espécies arbóreas diante da especificidade desse elemento. Valores cada vez mais apurados são essenciais para gerar estimativas de estoque de carbono e para formulação de projetos específicos a certificação de créditos de carbono (SILVA et al., 2022). Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi quantificar o teor de carbono nos compartimentos das árvores de *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl. (Castanha-da-Amazônia), *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. (Cumaru) e *Khaya grandifoliola* C. DC. (Mogno africano), presentes em sistema ILPF.

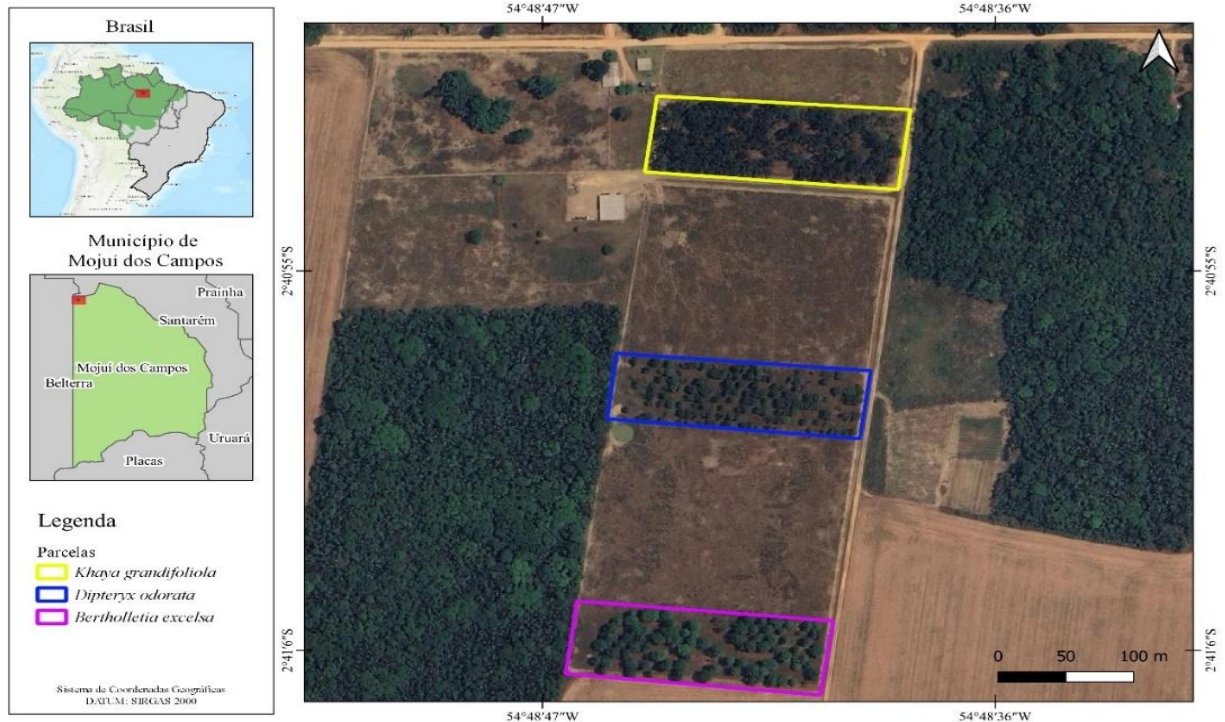
4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área de estudo

As amostras para obtenção do teor de carbono foram obtidas de árvores das espécies *B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*, com 11 anos, presentes no sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), localizado na Fazenda Nossa Senhora de Aparecida, no município de

Mojuí dos Campos, Pará, pertencente a mesorregião do baixo Amazonas, distante 37 km do centro de Santarém (pela rodovia Santarém-Cuiabá), município pólo da região Oeste do Pará (Figura 9).

Figura 9 – Mapa de localização do sistema ILPF presente na fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos, Pará.



Fonte: SANTOS, 2024.

O clima é considerado quente e úmido, com temperatura máxima de 36 °C e mínima 22,6 °C, e precipitação média anual em torno de 1.820 mm (MARTORANO et al., 2021). O relevo possui altitude média de 80 m acima do nível do mar, constituindo o “Planalto Santareno”, composto por pequenas elevações entre vales, com a presença de igarapés (CORTES et al., 2020). O solo é classificado como Latossolo Amarelo, de textura argilosa e vegetação predominantemente ombrófila densa de terra firme (GUERREIRO et al., 2017).

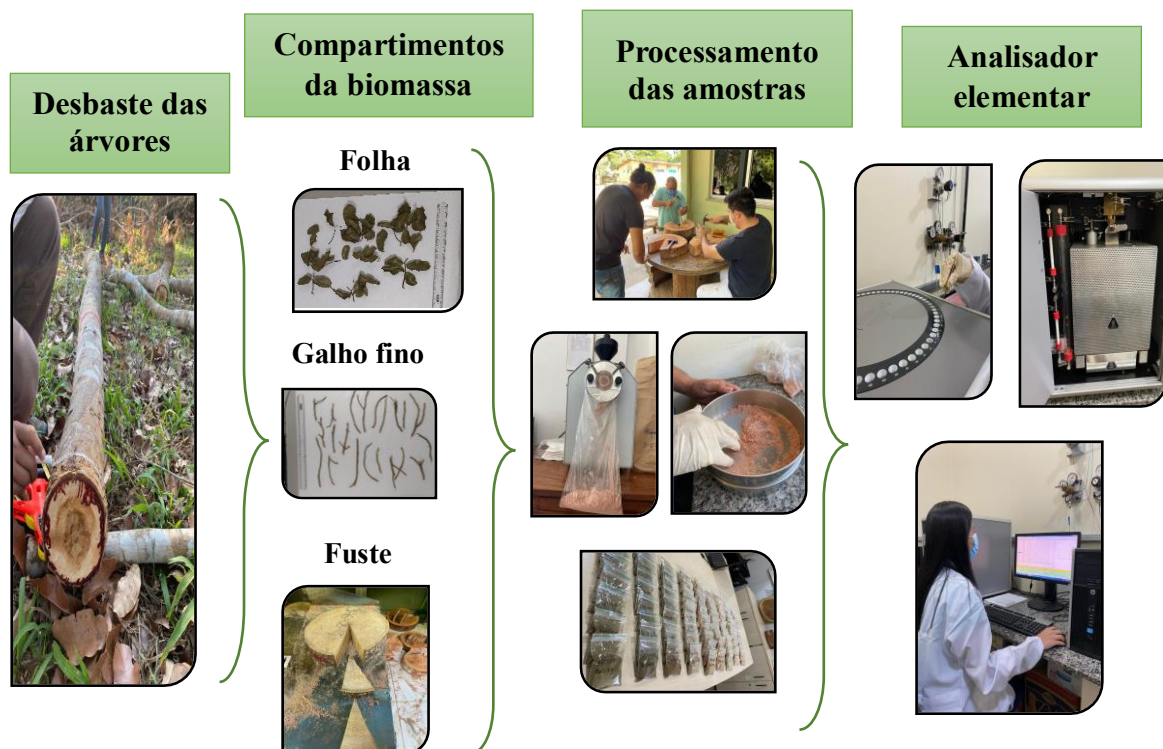
O sistema ILPF foi implantado em 2010, e como a área de estudo anteriormente era ocupada por pastagem cultivada para gado de corte, fez-se necessário o preparo do solo com aração, subsolagem e correção do solo com calcário dolomítico (SILVA et al., 2018). Neste sistema as árvores encontram-se organizadas em três talhões, com tamanho de 0,92 ha cada. Em cada talhão foi plantado uma espécie florestal, com as árvores dispostas em oito linhas, espaçamento 7 m x 5 m. Os talhões foram separados por uma distância de 166 m, nesse espaço foi cultivado culturas anuais e forragem.

Em 2021, o quantitativo de árvores presentes em cada talhão do sistema ILPF foi registrado como segue: *B. excelsa* com 200 árvores (25 indivíduos por linha), *D. odorata* com 240 árvores (30 indivíduos por linha) e *K. grandifoliola* com 264 árvores (33 indivíduos por linha). Após 11 anos sem intervenção silvicultural e sem irrigação, observou-se a necessidade de realizar um desbaste seletivo, visando a remoção de indivíduos com características fenotípicas indesejáveis, tais como fustes altamente tortuosos, árvores infestadas por cupins ou outros insetos que causam danos severos, e indivíduos com ausência de copas funcionais.

4.2.2 Coleta de dados

Foram selecionadas dez árvores de cada espécie de maneira aleatória para realizar o desbaste, essas árvores foram separadas e identificados os seus compartimentos: fuste, galho fino (circunferência $\leq 6,0$ cm) e folha, sendo considerada 10 amostras para cada compartimento, totalizando 30 amostras por espécie (Figura 10).

Figura 10 – Etapas metodológicas para obtenção do teor de carbono do compartimento das árvores de *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Fonte: SANTOS, 2024.

Os compartimentos de biomassa, especificamente galhos finos e folhas de cada árvore, foram fracionados em amostras de aproximadamente 300 g e acondicionados em sacos de papel kraft para preservação e transporte. Para representar o fuste, foram utilizados discos coletados da base do tronco. Todo o material coletado foi encaminhado ao Laboratório de Tecnologia da Madeira (LTM), da Universidade Federal do Oeste do Pará (Ufopa), para análise e determinação dos teores de carbono nos diferentes compartimentos amostrados (DALLAGNOL et al., 2011).

No LTM as amostras foram processadas em frações menores, com a ajuda de espátulas de ferro, formão e martelo. Os discos de madeira, que representam a amostra do fuste, foram fracionados em cunha, sendo retiradas lascas do lenho, desprezando-se a casca. Todas as amostras foram secas em estufa a temperatura de 70°C até peso constante (VIEIRA et al., 2009).

As frações dos componentes obtidas foram trituradas em moinho de seis facas e peneiradas com peneiras metálicas de 60 Mesh, até adquirir a consistência de pó. Para evitar contaminação das amostras foram realizadas limpezas no moinho e na peneira com jato de ar comprimido a cada amostra processada, e para garantir que as amostras não fossem contaminadas por microrganismos do ambiente, as mesmas foram armazenadas em sacos plásticos com zíper (VIEIRA et al., 2009).

Foram utilizadas 100 mg de cada amostra, para o teor de carbono, obtidas com auxílio de uma balança analítica, e depositadas em potes de cerâmicas, conhecidos como cadinhos, os quais foram levados para estufa a temperatura de $100\pm 2^{\circ}\text{C}$, por 24 horas. Posteriormente, as amostras passaram por um processo de resfriamento em dessecador, por 30 minutos, e foram embaladas individualmente em folhas de estanho para serem colocadas no analisador até a combustão completa (VIEIRA et al., 2009).

Para determinação do teor de carbono total das amostras foi utilizado um equipamento especializado para a análise de carbono, o analisador elementar de carbono VARIO MACRO CUBE, o qual possui um *software* para registro digital dos resultados. Nesse método, a amostra de material sólido é levada à combustão, sendo que um sensor detecta a quantidade de dióxido carbono (CO_2) gerado, relacionando automaticamente com a quantidade de carbono elementar existente na amostra. O controle da queima completa foi realizado por meio da observação da curva de combustão e do tubo externo ao equipamento contendo perclorato de magnésio. Ao final da combustão da amostra, o resultado em carbono (expresso em %) foi emitido pelo computador conectado ao analisador elementar (VIEIRA et al., 2009).

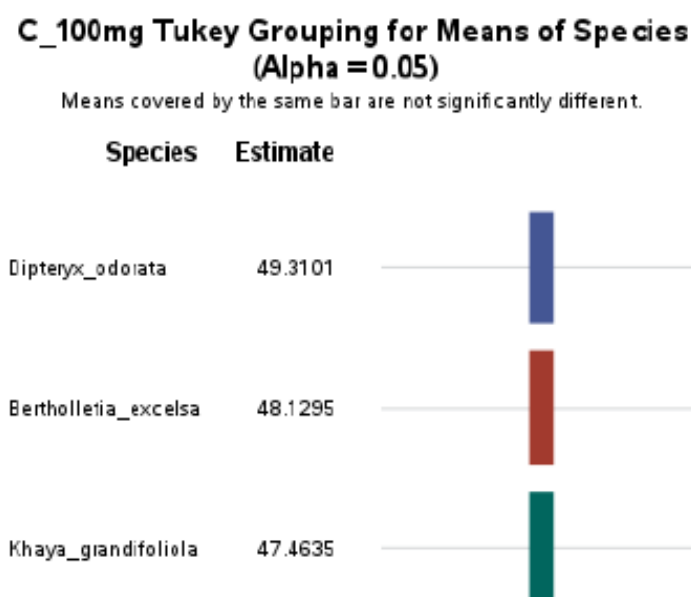
4.2.3 Análise de dados

Os dados foram tabulados em planilhas eletrônicas e a verificação das diferenças nos teores de carbono entre espécies e nos compartimentos da biomassa vegetal foram analisadas estatisticamente no software estatístico gratuito SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, 2023). Previamente, os dados passaram pelos testes de normalidade de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965). Com a normalidade nos dados detectada, prosseguiu-se com a Análise de variância (ANOVA) e teste Tukey em nível de significância de 5%. Além disso foi representado graficamente a interação do teor de carbono entre as espécies e seus compartimentos.

4.3 Resultados e Discussão

Os teores médios de carbono para cada espécie não apresentaram diferenças estatísticas significativas ($p > 0,05$). Comparando com o valor de referência de 50% estabelecido pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), observa-se que nenhuma das espécies atingiu esse patamar (IPCC, 2006). Contudo, *Dipteryx odorata* apresentou o teor médio mais próximo (49,31%), seguido por *Bertholletia excelsa* (48,13%) e *Khaya grandifoliola* (47,46%) (Figura 11).

Figura 11 – Teor de carbono, em %, das espécies *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



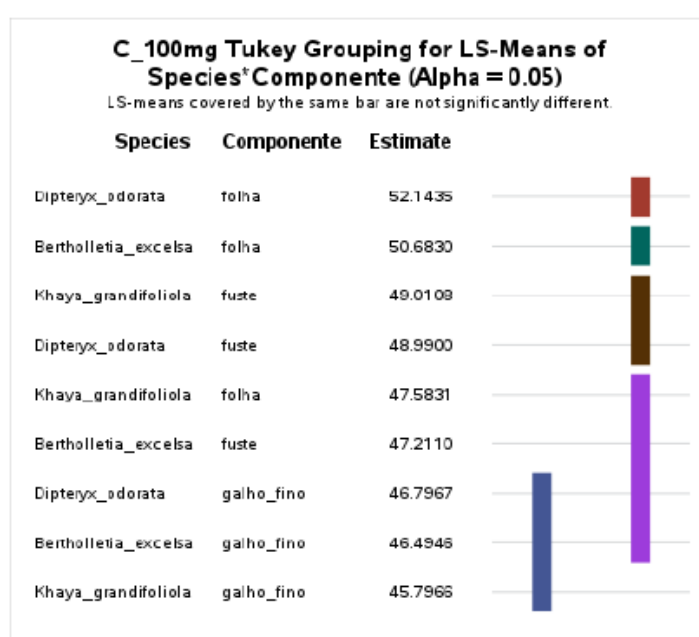
Fonte: SANTOS, 2024.

O teor de carbono na biomassa das plantas é resultado da interação dos genes com o meio, e do tipo de manejo e método de quantificação (SETTE JR.; NAKAJIMA; GEROMINI, 2006). Verifica-se que teores de carbono abaixo de 50% são comuns em espécies tropicais devido a fatores como variação genética, manejo silvicultural e condições ambientais específicas. Por exemplo, pesquisas conduzidas em sistemas agroflorestais da Amazônia apontam valores médios de carbono entre 47% e 49% para espécies nativas e exóticas, com variações atribuídas à densidade da madeira e ao estágio de desenvolvimento das árvores (THOMAS; MARTIN, 2012).

O teor de carbono também varia nos diferentes órgãos da planta (MA et al., 2018). Independentemente se a amostragem é de floresta nativa ou plantada, geralmente as plantas apresentam maior teor de carbono nas folhas, decrescendo para casca, tendo em vista que nas folhas e brotações a atividade metabólica é alta, principalmente pela transpiração da água e aumento do nível de sais (WEBER et al., 2006; WATZLAWICK et al., 2014).

Quanto ao teor de carbono nos diferentes compartimentos de biomassa (fuste, galho fino e folha), para as três espécies florestais (*B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*), verifica-se variações significativas nos teores de carbono entre os compartimentos e espécies, como as folhas de *D. odorata* com maior teor de carbono (52,14%), seguido pelas folhas de *B. excelsa* (50,68%), ambos acima do valor de referência do IPCC (50%) (Figura 12).

Figura 12 – Comparação do teor de carbono, em %, presente nos compartimentos de *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*, em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Fonte: SANTOS, 2024.

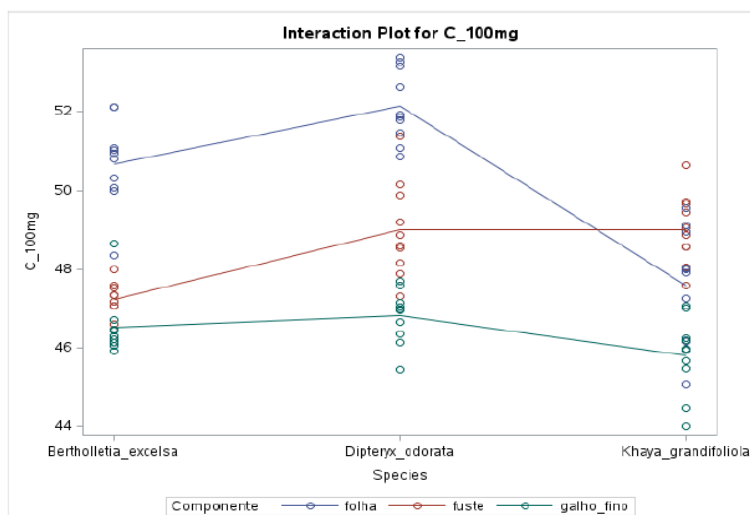
A folha foi o componente que apresentou maior teor de carbono em *B. excelsa* e *D. odorata*, essa informação está diretamente relacionada ao trabalho fisiológico que as mesmas desempenham na fotossíntese. Conforme ressaltam Taiz e Zeiger (2003), a planta geralmente apresenta uma rota de fixação de carbono ao longo da sua estrutura morfológica, sendo está: folhas, galhos, madeira, raiz e casca.

Estudo realizado por Zanini et al. (2022) em áreas florestais em restauração, relatam teores médios de carbono de 44,8, 44,5, 45,8 e 45,3% em folhas, galho, fuste e a média ponderada, respectivamente, destacando a importância das folhas como um compartimento de alto armazenamento de carbono. Para o fuste, estudos como o de Thomas e Martin (2012) observaram teores de carbono entre 41,9% e 51,6% em madeiras tropicais, valores condizentes com os encontrados para *K. grandifoliola* e *D. odorata*. A composição estrutural da madeira, aliada à densidade, é um fator determinante nesse compartimento, explicando os resultados observados.

Em relação aos galhos finos, os valores inferiores a 47% podem ser atribuídos ao menor teor de lignina e maior proporção de tecidos jovens. Trabalhos como o de Silva et al. (2022) também apontam que galhos finos frequentemente apresentam teores de carbono inferiores aos de outros compartimentos, variando entre 44% e 46%.

Quanto a interação entre as espécies e compartimentos, destaca-se a folha como o compartimento com o teor de carbono mais elevado. Esse resultado destaca o papel das folhas como importantes reservatórios de carbono devido à sua composição rica em compostos orgânicos e alta atividade metabólica (Figura 13).

Figura 13 – Interação do teor de carbono, em %, entre as espécies e compartimentos analisados de *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*, em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Os resultados expressam que os compartimentos de biomassa possuem diferentes capacidades de armazenar carbono, com as folhas se destacando como os maiores reservatórios em todas as espécies. As diferenças entre as espécies sugerem que fatores como composição química, densidade da madeira e características morfológicas influenciam significativamente os teores de carbono.

A heterogeneidade dos compartimentos de biomassa em relação ao teor de carbono reforça a necessidade de análises específicas para cada fração. Além disso, a proximidade dos valores observados com os dados reportados na literatura internacional evidencia o potencial dessas espécies para contribuir com estratégias de mitigação de mudanças climáticas em sistemas ILPF.

Por fim, a variabilidade entre espécies e compartimentos destaca a importância de práticas de manejo diferenciadas para otimizar o sequestro de carbono em sistema ILPF, especialmente em áreas de pastagens degradadas na Amazônia. Esses sistemas podem desempenhar um papel essencial na valorização de serviços ambientais e na consolidação de práticas de produção sustentável.

4.4 Conclusão

A heterogeneidade no teor de carbono entre os compartimentos da biomassa e as diferenças entre as espécies evidenciam a importância de análises específicas para cada fragmento e espécie.

As folhas apresentaram os maiores teores de carbono, com destaque para as folhas de *D. odorata* (52,14%) e *B. excelsa* (50,68%), ambos acima do valor de referência do IPCC.

Os sistemas ILPF, como demonstrado neste estudo, possuem grande potencial para a valorização de serviços ambientais e consolidação de práticas sustentáveis, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas.

Referências Bibliográficas

ASSIS, T. O.; AGUIAR, A. P. D.; RANDOW, C. V.; NOBRE, E. C. A. Projections of future Forest degradation and CO₂ emissions for the Brazilian Amazon. **Science Advances**, v. 8, eabj3309, 2022.

BRASIL. Lei n. 12.805, de 29 de abril de 2013. Institui a Política Nacional de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e altera a Lei n. 8.171, de 17 de janeiro de 1991. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2013. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12805.htm. Acesso em 01 nov. 2023.

BRASIL. Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022. Estabelece procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases do Efeito Estufa e altera o Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2022/decreto-11075-19-maio-2022-792682-publicacaooriginal-165314-pe.html>. Acesso em: 01 nov. 2023.

CORTES, J. P. S.; COUDEL, E.; PIRAUX, M.; SILVA, M. P.; SANTOS, B. A.; FOLHES, R.; SILVA, R. G. P. What are the perspectives of family agriculture in a context of agribusiness expansion? Participatory zoning with community representatives of the Plateau Santareno. **Franco-Brazilian Journal of Geography**, v. 45, 2020.

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, n. 4, p. 410-416, 2011.

GUERREIRO, Q. L. DE. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. DE; SANTOS, G. R. DOS; RUIVO, M. DE. L. P.; BELDINI, T. P.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, K. E. DA.; GUEDES, M. C.; SANTOS, P. R. B. Spatial variability of soil physical and chemical aspects in a Brazil nut tree stand in the Brazilian Amazon. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 4, p. 237-250, 2017.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [S. l.], 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. Acesso em: 01 nov. 2023.

MA, S.; HE, F.; TIAN, D.; ZOU, D.; YAN, Z.; YANG, Y.; ZHOU, T.; HUANG, K.; SHEN, H.; FANG, J. Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis. **Biogeosciences**, v. 15, n. 3, p. 693-702, 2018.

MARTORANO, L. G.; SOARES, W. B.; MORAES, J. R. S. C.; NASCIMENTO, W.; APARECIDO, L. E. O.; VILLA, P. M. Climatology of Air Temperature in Belterra: Thermal Regulation Ecosystem Services Provided by the Tapajós National Forest in the Amazon. **Brazilian Journal of Meteorology**, v. 36, n. 2, p. 327-337, 2021.

MENG, Y.; ZHANG, Y.; LI, C.; ZHAO, J.; WANG, Z.; WANG, C.; LI, Y. Prediction of the Carbon Content of Six Tree Species from Visible-Near-Infrared Spectroscopy. **Forests**, v. 12, n. 9, 1233, 2021.

MONTEIRO, A.; BARRETO-MENDES, L.; FANCHONE, A.; MORGAVI, D. P.; PEDREIRA, B.C.; MAGALHÃES, C.A.S.; ABDALLA, A.L.; EUGÈNE, M. Crop-livestock-forestry systems as a strategy for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing the sustainability of forage-based livestock systems in the Amazon biome. **Science of the Total Environment**, v. 906, 167396. 2024.

POTENZA, R. F.; QUINTANA, G. O.; CARDOSO, A. M.; TSAI, D. S.; CREMER, M. S.; SILVA, F. B.; CARVALHO, K.; COLUNA, I.; SHIMBO, J.; SILVA, C.; SOUZA, E.; ZIMBRES, B.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa (1970 a 2020) e suas implicações para as metas climáticas no Brasil**. SEEG, 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 01 nov. 2023.

SAIDELLES, F. L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; BALBINOT, R. Uso de equações para estimar carbono orgânico em plantações de *Acacia mearnsii* de Wild., no Rio Grande do Sul – Brasil. **Revista Árvore**, v. 33, n. 5, p. 907-915, 2009.

SETTE JR., C. R.; NAKAJIMA, N. Y.; GEROMINI, M. P. Captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Rio Negrinho, SC. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 33-44, 2006.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

SILVA, J. C. N.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; DANTAS, E. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S. Aggregation, carbon, and total soil nitrogen in crop-livestock-forest integration in the Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 12, p. 837-842, 2018.

SILVA, A. C. F.; FREIRE, F. J.; BORGES, C. H. A.; ARAUJO, E. C. G.; SANTANA, G. M.; CUNHA NETO, E. M.; SANQUETTA, C. R. Teores de carbono em espécies florestais da Caatinga. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 1, p. 71-85, 2022.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM. **Software de Analytics & Soluções**. 2023. Disponível em: https://www.sas.com/pt_br/home.html?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=brand-global&utm_content=GMS-88251&gclid=CjwKCAjwmbqoBhAgEiwACIjzEOhrfkTsrsU0oCZYVFrnb3IxEeLSbqIQYh-HJGSrfmiEctar0oVO-xoC5YAQAvD_BwE. Acesso em: 23 jun. 2023.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 3 ed. **Anais de Botânica**, v. 91, n. 6, p. 750-751, 2003.

THOMAS, S. C.; MARTIN, A. R. Carbon Content of Tree Tissues: A Synthesis. **Forests**, v. 3, n. 2, p. 332-352, 2012.

VIEIRA, G.; SANQUETTA, C. R.; KLÜPPEL, M. L. W.; BARBEIRO, L. DA S. S. Teores de Carbono em Espécies Vegetais da Caatinga e do Cerrado. **Revista Acadêmica de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 7, n. 2, p. 145-155, 2009.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. Carbono orgânico em povoamento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze no sul do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, v. 1, n. 2, p. 63-68, 2003.

WATZLAWICK, L. F.; MARTINS, P. J.; RODRIGUES, A. L.; EBLING, A. A.; BALBINOT, T. 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.; BALBINOT, R.; WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R. Teores de Carbono Orgânico de Seis Espécies Naturais do Ecossistema da Floresta Ombrófila Mista. **Ambiência**, v. 2, n. 2, p. 167-177, 2006.

ZANINI, A. M.; MAYRINCK, R. C.; VIEIRA, S. A.; RODRIGUES, R. R. Carbon content and allometric models to estimate aboveground biomass for forest areas under restoration. **Restoration Ecology**, v. 30, e13591, 2022.

5 CAPÍTULO III

DENSIDADE DA MADEIRA DE ESPÉCIES FLORESTAIS EM SISTEMA INTEGRADO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA: desafios e oportunidades para *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*⁴

⁴ O capítulo encontra-se de acordo com o Guia para elaboração e apresentação da produção acadêmica da Ufopa. Disponível em: <http://ufopa.edu.br/sibi/servicos-e-produtos/guia-de-normalizacao/>; e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

DENSIDADE DA MADEIRA DE ESPÉCIES FLORESTAIS EM SISTEMA INTEGRADO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA:
Desafios e oportunidades para *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*

RESUMO: A densidade da madeira é a propriedade física que está diretamente relacionada ao potencial madeireiro de uma espécie, mas também influencia no serviço ambiental como o armazenamento e sequestro de carbono na biomassa em áreas com silvicultura. Portanto, o objetivo foi avaliar a densidade da madeira em diferentes níveis de umidade (aparente, anidra e básica) das espécies *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* em um povoamento florestal jovem, cultivado em um sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). Na Unidade de Referência Tecnológica, localizada em Mojuí dos Campos, Pará, implantada em 2010, o sistema ILPF possuía árvores com características fenotípicas indesejáveis e sombreamento excessivo, portanto, necessitava de intervenção silvicultural (desbaste), que ocorreu em 2021. No desbaste foram coletadas amostras de madeira em cinco alturas, ao longo do fuste comercial (base [0%], 25%, 50%, 75% e topo [100%]) e utilizadas na análise de densidade da madeira (ρ). Os dados foram analisados usando pressupostos estatísticos, tais como: teste de normalidade (teste de Shapiro-Wilk), homogeneidade das variâncias (teste de Levene) e verificação de outliers (teste de Grubbs). Posteriormente, utilizou-se a análise de variância e o teste de Tukey para comparação das médias, com nível de significância de 5%. Os resultados expressaram que *D. odorata* apresentou as maiores densidades (0,99, 0,91 e 0,83, g.cm⁻³), enquanto na *B. excelsa* e *K. grandifoliola* as densidades foram menores (0,68, 0,61, 0,55, g.cm⁻³ e 0,61, 0,56, 0,51, g.cm⁻³, respectivamente). Notavelmente, *D. odorata* apresentou um aumento na densidade básica da base para o topo, enquanto *K. grandifoliola* demonstrou maior homogeneidade ao longo do tronco. Concluiu-se que a densidade é uma variável de avaliação não apenas da madeira das duas espécies nativas e de uma exótica, mas sobretudo que a densidade é uma variável para quantificar assertivamente o aporte em biomassa e carbono em sistemas de produção integrados, reforçando o potencial do ILPF como uma prática de produção sustentável em áreas de pastagens degradadas na Amazônia.

Palavras-chave: Plantios florestais jovens. Propriedade física da madeira. Potencial bioeconômico. Pará.

ABSTRACT: Wood density is a physical property directly related to the timber potential of a species, but it also influences environmental services such as carbon storage and sequestration in biomass in areas under forestry management. Therefore, the objective was to evaluate wood density at different moisture levels (apparent, anhydrous, and basic) for the species *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata*, and *Khaya grandifoliola* in a young forest stand cultivated in an Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLF) system. At the Technological Reference Unit located in Mojuí dos Campos, Pará, established in 2010, the ICLF system contained trees with undesirable phenotypic characteristics and excessive shading, necessitating silvicultural intervention (thinning), which was conducted in 2021. Wood samples were collected at five heights along the commercial bole (base [0%], 25%, 50%, 75%, and top [100%]) and used to analyze wood density (ρ). Data were analyzed using statistical assumptions, including normality tests (Shapiro-Wilk test), homogeneity of variances (Levene's test), and outlier verification (Grubbs' test). Analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test were subsequently employed for mean comparison at a 5% significance level. The results showed that *D. odorata* had the highest densities (0.99, 0.91, and 0.83 g.cm⁻³), while *B. excelsa* and *K. grandifoliola* had lower densities (0.68, 0.61, 0.55 g.cm⁻³ and 0.61, 0.56, 0.51 g.cm⁻³, respectively). Notably,

D. odorata displayed an increase in basic density from the base to the top, whereas *K. grandifoliola* demonstrated greater homogeneity along the trunk. It was concluded that density is a key variable not only for evaluating the wood of two native species and one exotic species but also for accurately quantifying biomass and carbon contributions in integrated production systems. This underscores the potential of ICLF as a sustainable production practice in degraded pasture areas within the Amazon.

Keywords: Young Forest plantations. Physical properties of wood. Bioeconomic potential. Pará.

5.1 Introdução

A Amazônia brasileira possui 497.222 km² de área degradada (PRODES, 2024), e como alternativa para reduzir essas áreas, as propriedades rurais têm adotado o sistema de produção Integrado Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), proporcionando maior segurança alimentar e sustentabilidade ambiental, sendo considerada uma solução baseada na natureza (MARTORANO et al., 2021a; NWAOGU; CHERUBIN, 2024). O sistema ILPF envolve a combinação de atividades agrícolas, pecuárias e florestais dentro da mesma área por meio de consórcio, rotação ou sucessão (BRASIL, 2013; MONTEIRO et al., 2024). A ILPF abrange aproximadamente 17 milhões de hectares em todo o Brasil (REDE ILPF, 2021).

Diversas espécies florestais são utilizadas em sistemas de ILPF na Amazônia (BEHLING et al., 2021; SANTANA et al., 2023; SOUZA et al., 2024), sendo o componente que permanece mais tempo no sistema, responsável por grande parte do acúmulo de carbono no solo e biomassa acima do solo (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011; CARAUTA et al., 2018). Portanto, para que as técnicas silviculturais sejam difundidas e o manejo adequado ocorra são necessárias informações sobre as características e usos das espécies.

Dentre as espécies utilizadas na ILPF, destacam-se as seguintes: *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl. (Castanha-da-Amazônia), *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. (Cumaru), ambas nativas da Amazônia, e a exótica *Khaya grandifoliola* C. DC. (Mogno africano). *B. excelsa* é uma espécie hiperdominante, atingindo 50 m de altura, valorizada por sua castanha e subprodutos, com óleos e farelo, contribuindo para a economia local, embora seja protegida da exploração madeireira por lei (WADT et al., 2023; SOUZA et al., 2023a; BRASIL, 2006). *D. odorata* é uma espécie clímax da família Fabaceae, atinge 35 m e é valorizada por sua madeira durável e sementes contendo cumarina, usada em várias indústrias (HERRERO-JÁUREGUI et al., 2013; SILVA-NETO; SILVA; GOMES, 2023). *K. grandifoliola*, da família Meliaceae, atinge 30 a 35 m, com madeira valorizada internacionalmente para móveis, construção e

instrumentos musicais (RIBEIRO; FERRAZ FILHO; SCOLFORO, 2017; REIS et al., 2019). Os papéis econômicos e ecológicos dessas espécies ressaltam seu potencial para o manejo sustentável nos sistemas florestais da Amazônia.

A densidade da madeira é a propriedade física diretamente relacionada ao potencial madeireiro de uma espécie e também influencia o serviço ambiental de armazenamento e sequestro de carbono (SCHULZ et al., 2019; SANTOS et al., 2021; ROMERO et al., 2024).

Neste contexto, a densidade pode ser determinada em diferentes níveis de umidade, nomeadamente: anidra (medida após a secagem da madeira, indicando a densidade sem qualquer teor de umidade); aparente (medida com o teor de umidade a níveis de campo, representando a densidade no seu estado natural); e básica (muitas vezes considerada a medida mais estável, pois representa a densidade no seu estado seco em estufa com base no volume da madeira quando está saturada de água) (REZENDE; ESCOBEDO, 1988). É importante ressaltar que a densidade básica é a mais citada na literatura para a determinação do uso do material lenhoso, pois reflete o nível máximo de saturação das fibras (OLIVEIRA et al., 2019).

A densidade da madeira de árvores plantadas é influenciada por tratamentos de solo envolvendo insumos químicos como Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK), além de fatores como espaçamento entre árvores, taxas de crescimento e condições climáticas (FERREIRA et al., 2019; LIMA et al., 2024; ROCHA et al., 2020). Além disso, as variações de densidade ocorrem tanto radialmente como longitudinalmente à medida que as árvores amadurecem (HSING; PAULA; PAULA, 2016) e são ainda afetadas por características específicas da espécie, grupo taxonômico e idade do povoamento (SETTE JR. et al., 2012; WASSENBERG et al., 2015). A contabilização destas variações de densidade ao longo do fuste é essencial para uma estimativa exata da biomassa florestal, uma vez que a desconsideração desta fonte sistemática de erro pode levar a imprecisões substanciais nas estimativas de biomassa, particularmente em sistemas intercalares como o sistema ILPF.

Existe uma falta significativa de estudos sobre a avaliação da densidade longitudinal da madeira em povoamentos jovens em sistemas de produção integrada. No entanto, a compreensão das variações de densidade ao longo do fuste em árvores jovens é limitada, apesar de sua importância para estimativas precisas de biomassa, avaliações de estoque de carbono e estratégias de utilização sustentável da madeira (BONFATTI JÚNIOR et al., 2023; PIMENTA et al., 2024).

Os perfis de densidade longitudinal podem variar significativamente, influenciando a qualidade e as aplicações da madeira, especialmente em espécies cultivadas em plantações de alta densidade, onde a competição e as condições ambientais afetam os padrões de crescimento

(ZHANG; REN; JIANG, 2021). A resolução desta lacuna de investigação é essencial para o avanço dos modelos de produção integrado que visam a conservação da biodiversidade e o apoio a economia local. Portanto, o objetivo deste estudo é avaliar a densidade da madeira em diferentes níveis de umidade (aparente, anidra e básica) das espécies *B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola* em um povoamento florestal jovem.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Área de estudo

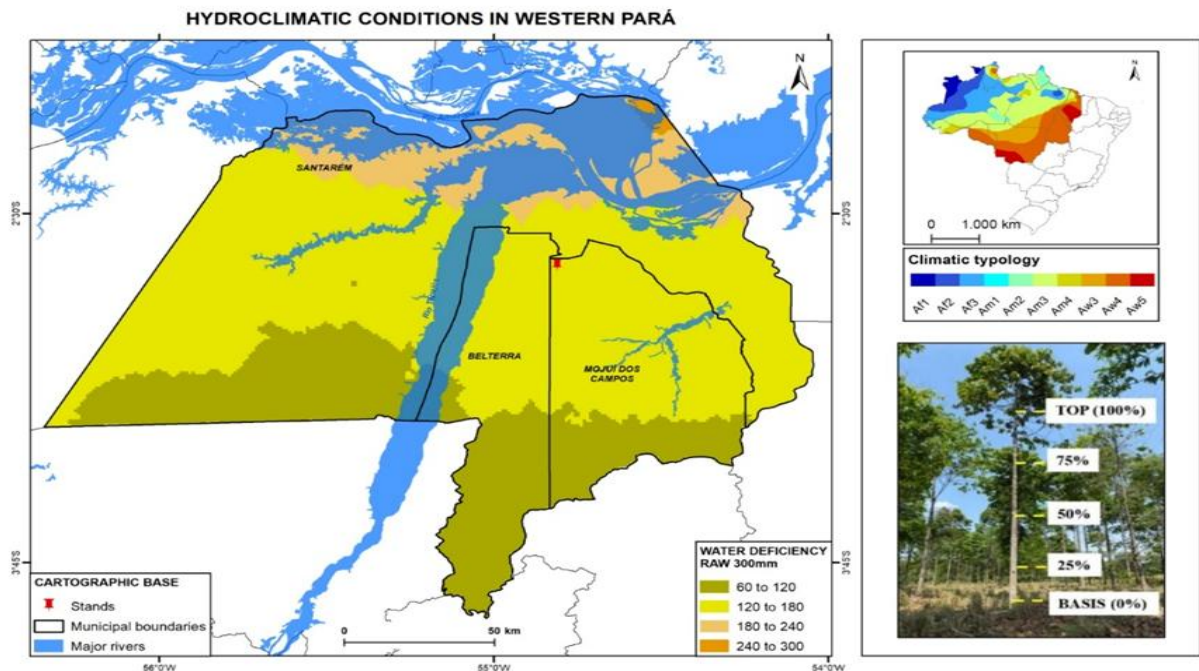
O estudo foi realizado na Unidade de Referência Tecnológica (URT), localizada na fazenda Nossa Senhora Aparecida, em uma parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Amazônia Oriental) e o produtor rural, sob o contrato nº. 22500.10/0039. A URT está localizada no município de Mojuí dos Campos, Pará, entre as coordenadas geográficas 02°38'11" S e 54°56'13" W, a 37 km do centro de Santarém, Pará (BR 316/Santarém-Cuiabá), pólo comercial da região oeste do Pará.

A altimetria da área de estudo é representativa do “Planalto Santareno”, caracterizado por uma elevação média de 153 m acima do nível do mar (CORTES et al., 2020). Essa região apresenta pequenas depressões entre vales que dão origem a igarapés, que acabam desaguardo no rio Tapajós (CÂNDIDO et al., 2023). O solo predominante na região é classificado como Latossolo Amarelo, caracterizado por textura média a muito argilosa, drenagem profunda e boa retenção de água. A vegetação é composta principalmente por floresta ombrófila densa de terra firme (GUERREIRO et al., 2017).

A tipologia climática predominante é a Am₃ de acordo com a adaptação da metodologia de Köppen proposta por Martorano, Pereira e Nechet (1993), indicando que há meses com precipitação inferior a 60 mm e precipitação anual variando de 2.000 mm a 2.500 mm, sendo que o período mais chuvoso ocorre de dezembro a maio, concentrando 80% do volume de chuvas, e o menos chuvoso (20%) de junho a novembro (MARTORANO et al., 2021b).

Ao observar o mapa de deficiência hídrica com valores variando de 120 mm a 180 mm (capacidade da água disponível - RAW = 300 mm), indica que essas são condições de estoques médios de água no solo para plantas adultas (Figura 14). De acordo com Costa et al. (2018), a área de estudo é influenciada por temperaturas médias de 26,5 °C e em termos de médias climáticas, a temperatura máxima varia entre 30,5 e 32,0 °C e a mínima entre 21,0 e 22,5 °C.

Figura 14 – Mapa de localização da área de estudo com dados sobre a tipologia climática do entorno, precipitação pluviométrica anual e base cartográfica, provenientes do ano de 2021.



Fonte: SANTOS, 2024.

O histórico da URT foi detalhado por Silva et al. (2018) e atualmente está estabelecida como um sistema integrado pecuário-florestal, conforme observado por Cândido et al. (2023). Neste sistema, as espécies florestais *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* crescem há 11 anos sem irrigação e tratamento silvicultural. Estas espécies estão dispostas em oito linhas, espaçadas em 7 m e com uma distância entre linhas de 5 m, cobrindo uma área total de 0,92 hectares em cada talhão.

As plantações contavam com 200 árvores de *B. excelsa* (25 indivíduos por linha), 240 árvores de *D. odorata* (30 indivíduos por linha) e 264 árvores de *K. grandifoliola* (33 indivíduos por linha). O sistema estava sendo utilizado praticamente como área de repouso para o gado zebu, que, durante as horas de sol, utilizava as parcelas arbóreas apenas como refúgio/abrigo/abrigo para conforto animal, uma vez que as pastagens apresentavam um desempenho inferior devido à densidade das árvores. Os animais utilizam predominantemente 7,3 ha com gramíneas (*Panicum maximum* Jacq.) que intercalam os talhões. É importante ressaltar que essas diferenças entre os números de indivíduos nos talhões se devem às perdas inerentes a consolidação de uma unidade experimental em sistema ILPF.

5.2.2 Coleta de dados

Em 2021 foram coletadas árvores para garantir o pleno funcionamento do sistema de produção integrada, considerando a manutenção do componente florestal com as melhores características fenotípicas para também proporcionar a penetração de luz nas gramíneas de cada parcela.

Foi realizado o inventário do componente florestal, obtendo-se as variáveis dendrométricas: diâmetro à 1,30 m do solo, com auxílio da fita métrica; altura total e comercial (até a primeira bifurcação), utilizando o hipsômetro Trupulse 360. Realizou-se a distribuição diamétrica das árvores para garantir a representação de todos os tamanhos (Tabela 6).

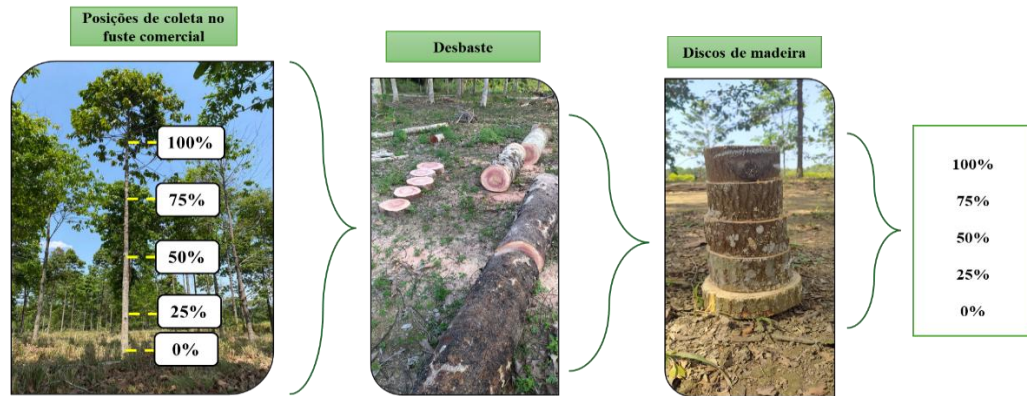
Tabela 6 – Número de árvores coletadas de acordo com a classe diamétrica dos indivíduos selecionados.

<i>Bertholletia excelsa</i> / classe diamétrica (cm)							
	6 ≤DAP<11	11≤ DAP <16	16≤ DAP <21	21≤ DAP<26	26≤ DAP<31	DAP ≥31	Total
N	5	4	5	5	5	5	29
<i>Dipteryx odorata</i> / classe diamétrica (cm)							
	6≤DAP<9	9≤ DAP <12	12≤ DAP <15	15≤ DAP<18	18≤ DAP<21	DAP ≥21	Total
N	5	5	4	5	2	3	24
<i>Khaya grandifoliola</i> / classe diamétrica (cm)							
	12≤ DAP <17	17≤ DAP <22	22≤ DAP <27	27≤ DAP<32	DAP ≥32		Total
N	5	5	4	5	5		24

Fonte: SANTOS, 2024.

A coleta de dados em campo deu-se a partir do desbaste e da realização de secções (discos) de 5,0 cm de espessura extraídas de cada árvore, de acordo com a altura comercial, nas seguintes posições relativas na árvore: base (0%), 25%, 50%, 75% e topo (100%) (RAMALHO et al., 2019). É importante ressaltar que a coleta do material ocorreu entre setembro e novembro de 2021, que é tipicamente o período mais seco na região amazônica, minimizando o potencial impacto das chuvas nos dados coletados (LONGO et al., 2020) (Figura 15).

Figura 15 – Coleta de discos de madeira ao longo do fuste comercial.



Fonte: SANTOS, 2024.

No Laboratório de Tecnologia da Madeira (LTM), da Universidade Federal do Oeste do Pará, foi retirado de cada disco uma amostra em forma de cunha correspondente a 1/8 do disco, e a casca foi descartada (GENDVILAS et al., 2022). As cunhas foram identificadas, pesadas em balança de precisão e organizadas em sacos de malha contendo cinco amostras de cada árvore. As amostras foram imersas em tanque de água até atingirem a saturação total, após o que foi determinado o volume verde das amostras (Figura 16). O material amostral foi então mantido em estufa de ventilação forçada a 60 °C até atingir 0% de umidade, para retirada da água por capilaridade.

Figura 16 – Esquema metodológico para obtenção da densidade da madeira em diferentes níveis de umidade das árvores presente no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Fonte: SANTOS, 2024.

As equações para obtenção da densidade aparente, anidra e básica estão demonstradas em Eq. 1, Eq. 2 e Eq. 3. Foi necessário aplicar a média ponderada com base no diâmetro de cada amostra para tornar os dados mais robustos e confiáveis, conforme Eq. 4, descrita por Downes et al. (1997) (Tabela 7).

Tabela 7 – Equações para obtenção da densidade da madeira do componente florestal presente no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

Nº	Nome	Abreviação	Equação
Eq.1	Densidade aparente (g.cm ⁻³)	ρ aparente	$\rho_{aparente} = \frac{m_{12}}{V_{12}}$
Eq.2	Densidade anidra (g.cm ⁻³)	ρ anidra	$\rho_{anidra} = \frac{m_0}{V_0}$
Eq.3	Densidade básica (g.cm ⁻³)	ρ básica	$\rho_{básica} = \frac{m_s}{V_{sat}}$
Eq.4	Densidade ponderada (g.cm ⁻³)	ρ	$\rho = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(\rho_0 + \rho_{25}) * (\rho_0^2 + \rho_{25}^2) + \dots \dots \dots (\rho_{75} + \rho_{100}) * (\rho_0^2 + \rho_{25}^2)}{d_0^2 + d_{100}^2 + 2 * (d_{25}^2 + 2 * (d_{25}^2 + d_{50}^2 + d_{75}^2))} \right\}$

Nota: m₁₂: massa da madeira a 12% de umidade (g); V₁₂: volume da madeira a 12% de umidade (cm³); m₀: massa seca de madeira com 0% de umidade (g); V₀: volume de madeira com 0% de umidade (cm³); m_s: massa seca (g); V_{sat}: volume saturado (cm³); ρ₀ a ρ₁₀₀: densidade de cunha da base (0%) ao topo (100%) na altura comercial (g.cm⁻³); d₀ a d₁₀₀: diâmetro do disco da base (0%) ao diâmetro superior (100%) na altura comercial (cm). **Fonte:** DOWNES et al. (1997); OLIVEIRA et al., 2019.

5.2.3 Análise de dados

Foram considerados dois desenhos experimentais para a análise de dados:

Desenho experimental 1: analisa a diferença entre os tipos de densidade nas espécies, sendo: Universo amostral – espécies florestais (*B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*); tratamentos – tipo de densidade (aparente, anidra e básica); replicações – amostras (cunhas) coletadas do fuste, com base na densidade ponderada (Equação 4).

Desenho experimental 2: analisa a diferença da densidade básica ao longo do caule das espécies, sendo: Universo amostral – espécies florestais (*B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*); tratamentos – posições de coleta no caule (0%, 25%, 50%, 75% e 100%); replicações – amostras (cunhas) coletadas do fuste.

Os dados foram submetidos a pressupostos estatísticos, tais como: normalidade dos dados (teste de Shapiro-Wilk), homogeneidade das variâncias (teste de Levene) e verificação de outliers (teste de Grubbs). Posteriormente, utilizou-se análise de variância e teste de Tukey para comparação de médias, com nível de significância de 5%. Quando necessário, utilizou-se o método de potência ótima de Box-Cox para transformar as variáveis (BOX; COX, 1964).

Além disso, os dados de densidade básica ao longo do fuste foram analisados por meio de estatística multivariada, representada graficamente pelo dendrograma e elipse de confiança das médias, por meio do software estatístico gratuito SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, 2023).

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Diferenças nos tipos de densidade e suas implicações para a ILPF

Os valores médios encontrados para a densidade da madeira aparente, anidra e básica do componente florestal apresentam comportamento decrescente. Em *D. odorata* os valores foram - ρ aparente: 0,99 g.cm⁻³; ρ anidra: 0,91 g.cm⁻³; ρ básica: 0,83 g.cm⁻³, para *B. excelsa* - ρ aparente: 0,68 g.cm⁻³; ρ anidra: 0,61 g.cm⁻³; ρ básica: 0,55 g.cm⁻³, e *K. Grandifoliola* - ρ aparente: 0,61 g.cm⁻³; ρ anidra: 0,56 g.cm⁻³; ρ básica: 0,51 g.cm⁻³. A espécie que apresentou maior valor de DAP foi *K. grandifoliola*, com média de 32,18 cm, seguida de *B. excelsa*, com 20,92 cm e *D. odorata* com 13,86 cm (Tabela 8). Essas informações têm implicações importantes para a compreensão das propriedades físicas das madeiras e para sua aplicação no sistema ILPF.

Tabela 8 – Valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação para densidade aparente, anidra e básica, teste de Shapiro-Wilk e diâmetro à altura do peito (DAP) da madeira dos componentes florestais presentes no sistema ILPF.

Densidade ρ (g.cm ⁻³)	Espécie		
	<i>Bertholletia excelsa</i>	<i>Dipteryx odorata</i>	<i>Khaya grandifoliola</i>
Aparente	0,68 ($\pm$ 0,05) a	0,99 ($\pm$ 0,10) a	0,61 ($\pm$ 0,06) a
Anidra	0,61 ($\pm$ 0,03) b	0,91 ($\pm$ 0,10) b	0,56 ($\pm$ 0,04) b
Básica	0,55 ($\pm$ 0,03) c	0,83 ($\pm$ 0,06) c	0,51 ($\pm$ 0,05) c
CV (%)	6,44	9,76	9,17
Shapiro-Wilk	0,96	0,93	0,97
DAP (cm)	20,92 ($\pm$ 7,86)	13,86 ($\pm$ 4,70)	32,18 ($\pm$ 9,58)

Nota: Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. **Fonte:** SANTOS, 2024.

Neste contexto, a densidade aparente está geralmente associada à resistência e à rigidez da madeira (CHRISTOFORO et al., 2020). No sistema ILPF, onde as árvores coexistem com culturas anuais e pastagens, a densidade aparente é uma métrica essencial para avaliar o potencial madeireiro, sendo que a *D. odorata* apresenta a maior densidade aparente (0,99 g.cm⁻³

³). De acordo com Bamber, Horne e Graham-Higgs (1982), o aumento da densidade aparente deve-se a alterações na morfologia das fibras, com o aumento da fração da parede celular.

A densidade anidra refere-se à densidade da madeira completamente seca, sem qualquer teor de umidade (ALTGEN et al., 2023). Este tipo de densidade é relevante para a utilização da madeira em aplicações industriais. A *D. odorata*, que possui densidade anidra de $0,91 \text{ g.cm}^{-3}$, pode ser utilizada para fornecer madeira com boa resistência, adequada para uso estrutural, inclusive em aplicações que possam reduzir o custo de insumos externos na propriedade (SILVA-NETO; SILVA; GOMES, 2023).

A densidade básica é considerada a medida mais estável e reflete a relação entre a massa seca e o volume saturado da madeira (ABNT, 2003). No sistema ILPF, a densidade básica é importante para o planejamento de longo prazo, pois fornece uma medida padrão para comparação de espécies e ajuda a entender o comportamento da madeira ao longo do tempo e sob mudanças ambientais (ELOY et al., 2024). *K. grandifoliola*, com densidade básica de $0,51 \text{ g.cm}^{-3}$, pode ser mais adequada para áreas onde o foco é o crescimento rápido e a produção de madeira leve para usos menos exigentes, enquanto *D. odorata*, com $0,83 \text{ g.cm}^{-3}$, fornece madeira mais densa e durável, adequada para uso industrial ou comercial de longo prazo (REIS et al., 2019; SOUSA et al., 2019).

A variabilidade entre as espécies, expressa pelo CV% e pelo DAP, permite a seleção de espécies específicas para diferentes funções dentro do sistema. Os valores do teste de Shapiro-Wilk sugerem que os dados para cada tipo de densidade têm uma distribuição aproximadamente normal. Espécies com menor variabilidade de densidade, como *B. excelsa* (CV% de 6,44%), podem fornecer maior previsibilidade em relação à biomassa e estoque de carbono (SOUZA et al., 2023b). Por outro lado, o maior DAP médio de *K. grandifoliola* (32,18 cm) indica que essa espécie pode ser utilizada em um sistema de ILPF voltado para a rápida produção de biomassa, beneficiando sistemas com alta rotatividade de colheita e diversificação de produtos (SANTOS et al., 2020; GOMES et al., 2024).

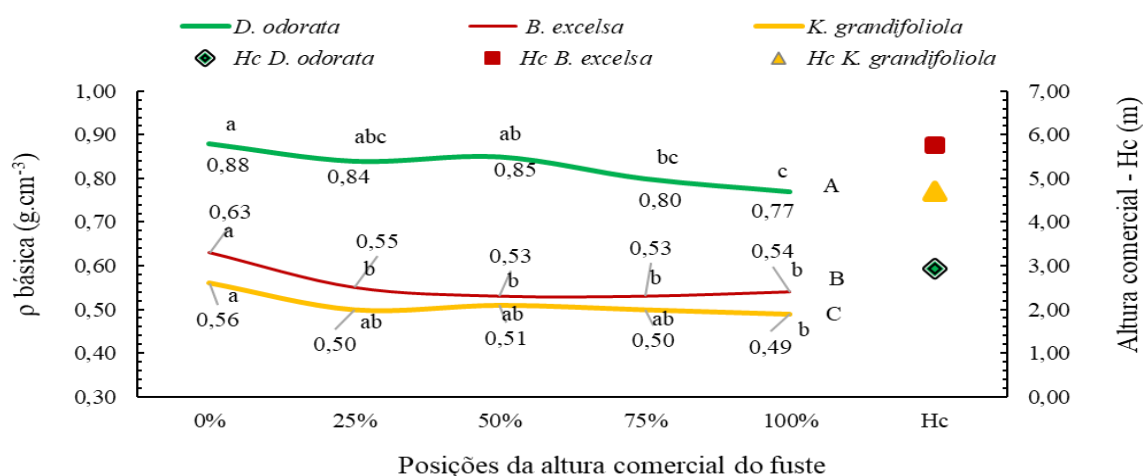
As densidades das madeiras analisadas auxiliam na seleção das espécies mais adequadas para os objetivos específicos de cada sistema de ILPF, promovendo o equilíbrio entre produtividade, sustentabilidade e conservação dos recursos naturais.

5.3.2 Variação longitudinal da densidade básica da madeira

A densidade básica é mais comumente usada em pesquisas científicas, pois representa a madeira em seu estado máximo de expansão, com teor de umidade acima do ponto de saturação da fibra (aproximadamente 30%). A Associação Internacional de Anatomistas da Madeira

(IAWA) considera a densidade básica para classificação do uso da madeira (WHEELER; BAAS; GASSON, 1989). Este parâmetro fornece uma medida consistente para comparar a densidade da madeira entre espécies, pois exclui variações causadas por níveis de umidade abaixo do limite de saturação (OLIVEIRA et al., 2019). Por esse motivo, a densidade básica da madeira de espécies florestais presentes no ILPF foi analisada detalhadamente ao longo do fuste, onde uma curva de decaimento semelhante foi observada entre as três espécies (Figura 17).

Figura 17 – Perfil médio da variação da densidade básica ao longo do fuste da madeira de *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*, em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Nota: Letras maiúsculas comparam a densidade básica entre as espécies e letras minúsculas comparam a densidade básica ao longo do fuste de cada espécie. Letras iguais não diferem estatisticamente entre si. Formas geométricas referem-se à altura comercial de cada espécie. **Fonte:** SANTOS, 2024.

A análise da densidade básica ao longo dos fustes de *D. odorata*, *B. excelsa* e *K. grandifoliola* revela padrões distintos com implicações para o manejo florestal. *D. odorata* exibiu a maior densidade básica próximo do solo (0%) com 0,88 g.cm⁻³, que diminuiu gradualmente ao longo do fuste (0,85, 0,80 e 0,77 g.cm⁻³ a 50%, 75% e 100% do caule, respectivamente), indicando que a madeira mais densa está na base, provavelmente devido à concentração de madeira madura. Em *B. excelsa*, uma diferença significativa de densidade foi observada apenas na base (0,63 g.cm⁻³), sugerindo que a massa se acumula ali para dar suporte aos papéis estruturais e ecológicos da árvore. *K. grandifoliola*, uma espécie exótica, mostrou distribuição de densidade uniforme, com variação significativa apenas entre a base e o resto do caule, tornando-a uma candidata promissora para culturas florestais na região devido à sua qualidade consistente de madeira.

Estas descobertas estão alinhadas com estudos anteriores que indicam uma diminuição geral na densidade básica da base para o topo, atribuída a uma mudança da madeira madura para a juvenil (DIMOU; TSALIKI; KITIKIDOU, 2023; ROMERO et al., 2024; HSING; PAULA; PAULA, 2016). A densidade básica da madeira avaliada no presente estudo é de fundamental importância, pois influencia diretamente o processamento e utilização da madeira e serve de base para estimar a biomassa aérea e o estoque de carbono (SILVEIRA et al., 2022; POORTER et al., 2015). Contudo, os estudos que analisam a densidade básica da madeira ao longo do fuste das espécies incluídas nesta pesquisa são limitados (FRANÇA et al., 2015).

Latreille et al. (2018) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de *Dipteryx alata* (Baru), espécie em monocultivo com 10 anos de idade e pertencente ao mesmo gênero de *Dipteryx odorata* (Cumaru), e relataram densidade básica de $0,78 \text{ g.cm}^{-3}$; no entanto, este estudo não forneceu uma análise detalhada ao longo do caule. Observou-se que a densidade básica foi inferior à encontrada no presente estudo, com diferença de idade de apenas um ano, indicando que a madeira de *D. odorata* na presente pesquisa é mais densa.

Lima et al. (2024) examinaram as propriedades da madeira de vinte espécies de árvores amazônicas com potencial para uso comercial de madeira e identificaram *D. odorata* como tendo a maior densidade básica entre elas, $0,91 \text{ g.cm}^{-3}$. Essa alta densidade contribui para a desejabilidade da espécie no mercado, tornando-a uma das mais exploradas na Amazônia (HONORIO-CORONADO et al., 2020). Além de seu valor como recurso madeireiro, *D. odorata* também apresenta potencial para benefícios ecológicos. Brasil-Neto et al. (2021) destacaram sua adequação para esforços de reflorestamento e seu papel na melhoria da qualidade do solo em pastagens degradadas na Amazônia Oriental.

A densidade básica da madeira de *B. excelsa* em florestas nativas da Amazônia brasileira é de $0,62 \text{ g.cm}^{-3}$ (FEARNSIDE, 1997), valor semelhante ao observado no presente estudo, onde a espécie está em fase juvenil, localizada em uma área degradada em recuperação. *B. excelsa*, embora proibida de colheita comercial no Brasil (BRASIL, 2006), pode aumentar o valor econômico e ecológico dos sistemas integrados. Quando presente nesses sistemas, *B. excelsa* fornece produtos adicionais para comercialização, como sementes, que estabeleceram mercados nacionais e internacionais, e contribui para estratégias de armazenamento de carbono (VIEIRA et al., 2022; SOUZA et al., 2023c). Esta versatilidade acrescenta ainda mais valor aos sistemas integrados, fortalecendo a necessidade de incluir espécies nativas com elevado valor ecológico em práticas de cultivo sustentáveis.

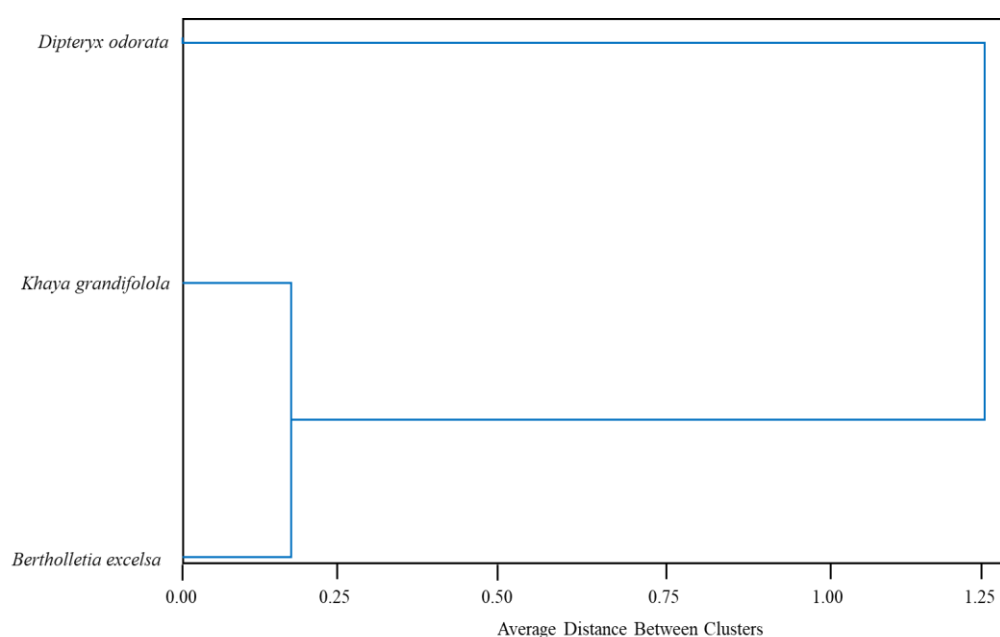
Momolli et al. (2024) realizaram a caracterização detalhada da densidade da madeira em *K. grandifoliola* cultivada em monocultura com espaçamento de plantio de 30 cm x 30 cm,

aos 9,5 anos de idade. Observaram que a espécie apresentava densidade básica variando de 47,8 g.cm⁻³ a 55,9 g.cm⁻³, com diminuição da densidade ao longo do fuste. Nas posições intermediárias (25%, 50% e 75%) não foram observadas diferenças significativas na densidade. As árvores apresentaram Hc médio de 5,7 m e DAP médio de 21,3 cm. Todas as características foram semelhantes as de *K. grandifoliola* da presente área de estudo, exceto o DAP, que foi maior, com valor de 32,18 cm, provavelmente devido ao maior espaçamento utilizado.

A combinação de espécies nativas e exóticas para a recuperação de áreas degradadas está estabelecida na Lei nº 12.651/2012, conhecida como “Novo Código Florestal” (BRASIL, 2012). Este instrumento legal dá suporte ao uso de espécies como *K. grandifoliola* na recomposição de reservas legais. A lei facilita a incorporação de práticas agroflorestais e outras práticas sustentáveis em programas de regularização ambiental, tanto em propriedades rurais tituladas como em áreas com posse de terra, promovendo assim tanto a restauração ecológica como a produção sustentável.

Com base nos valores de densidade básica analisados ao longo do fuste, confirma-se que exista semelhança entre a madeira de *B. excelsa* e *K. grandifoliola*, pois formam um único clado a partir do corte em 25% do fuste comercial. Por outro lado, *D. odorata* possui característica de densidade básica distinta, que difere das outras duas espécies analisadas neste estudo (Figura 18).

Figura 18 – Dendrograma utilizando o método de ligação média entre as duas espécies nativas e as exóticas (*Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*) comparando as densidades obtidas ao longo do fuste comercial, em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

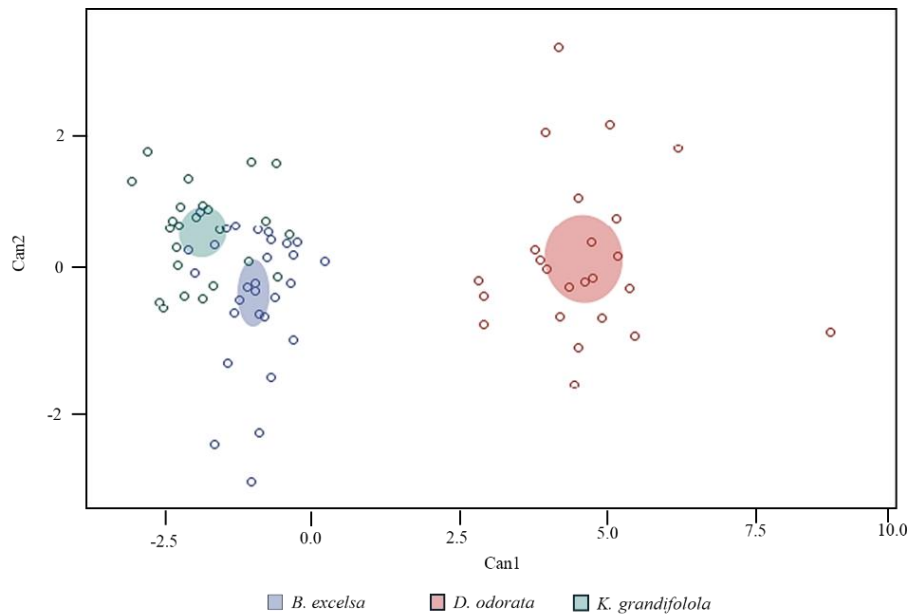


Como a densidade da madeira é o resultado da relação entre duas grandezas físicas, massa e volume, esta propriedade permite agrupar espécies semelhantes, atribuir usos e aplicações, inferir sobre a quantificação do carbono armazenado nas florestas (ROMERO et al., 2024). Portanto, apesar das espécies possuírem densidades distintas, é possível agrupá-las, sendo *B. excelsa* e *K. grandifoliola* classificadas como madeira de média densidade, enquanto *D. odorata* é caracterizada como madeira pesada, segundo a classificação IAWA (WHEELER; BAAS; GASSON, 1989). Isto reforça a importância de escolher espécies com base nas propriedades da madeira, para fins de restauração e reflorestamento, para atingir objetivos ecológicos e econômicos em sistema ILPF.

As árvores contribuem significativamente para o sequestro de carbono a longo prazo, tanto na biomassa como no solo (WARING et al., 2020, REIS et al., 2021). Por exemplo, em Paragominas, município do Pará, os sistemas integrados são amplamente utilizados e foram observadas melhorias nas propriedades do solo, pois o aumento da matéria orgânica contribuiu para maiores estoques de CO₂ nas camadas mais superficiais do perfil do solo (FERNANDES; CHAVES; MARTORANO, 2019). Portanto, a seleção de espécies como *B. excelsa* e *K. grandifoliola* não só aumenta a produção de madeira e o seu valor econômico, mas também pode contribuir para o melhor armazenamento de carbono na biomassa e no solo, apoiando ainda mais os objetivos de sustentabilidade dos sistemas ILPF (SOUZA et al., 2023b).

A análise discriminante canônica destacou as diferenças entre as densidades básicas das três espécies. A variável canônica 1 separou *D. odorata* das outras duas espécies, principalmente por apresentar valores mais elevados nas posições 25% (10,92) e 75% (5,10) do caule comercial. Portanto, a análise gráfica geral indica que as três espécies são distintas de acordo com as duas variáveis canônicas, pois as elipses de 95% de confiança não se cruzam, reforçando a separação de *D. odorata* em termos de densidade básica da madeira ao longo do fuste (Figura 19).

Figura 19 – Elipses de confiança para o vetor de médias (95%), segundo as duas primeiras variáveis discriminantes canônicas entre as densidades básicas ao longo do caule das espécies *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*, considerando as densidades obtidas ao longo do caule comercial em sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Fonte: SANTOS, 2024.

D. odorata apesar da elevada densidade básica da madeira, o que a torna altamente valiosa no mercado madeireiro, também apresenta significativo potencial bioeconômico devido as suas sementes, utilizadas na indústria alimentícia e para a obtenção do composto químico denominado cumarina, amplamente utilizado nas indústrias de perfumaria (SOUSA et al., 2022). *B. excelsa*, por ser uma espécie com uso madeireiro proibido (BRASIL, 2006), destaca-se principalmente por seus produtos não madeireiros, como frutos e sementes, que são comercializados há muitas décadas pela população tradicional da Amazônia (SOUZA et al., 2023c; MEDEIROS; WADT; KAINER, 2024).

Portanto, a promoção de práticas sustentáveis que levem em conta o potencial ecológico e bioeconômico dessas espécies garantirá sua sobrevivência e contribuição a longo prazo para os ecossistemas amazônicos. O sistema ILPF oferece uma oportunidade para aumentar a consciência sobre os papéis ecológicos mais amplos destas espécies e o seu potencial para impulsionar práticas sustentáveis, particularmente na utilização de produtos não madeireiros e serviços ambientais. Assim, um dos principais desafios para ambas as espécies é garantir sua função ecológica na Amazônia.

5.4 Conclusão

Os resultados apresentados fornecem suporte técnico robusto para subsidiar a tomada de decisão quanto ao uso de espécies nativas e exóticas em sistemas integrados de produção:

Dipteryx odorata é a espécie com maior densidade de madeira, principalmente na base do fuste comercial, o que a torna uma espécie muito valorizada no mercado madeireiro. No entanto, para capitalizar estas oportunidades e mitigar riscos potenciais é essencial implementar estratégias de gestão adaptativa que reconheçam as diferenças específicas das espécies e promovam práticas florestais sustentáveis;

Bertholletia excelsa apresentou densidade básica consistente ao longo do fuste comercial e se destacou pela maior altura comercial entre as espécies avaliadas. Embora demonstre um claro potencial madeireiro, as suas características sugerem uma elevada eficiência na prestação de serviços ambientais, como o sequestro de carbono, desempenhando um papel significativo na mitigação das alterações climáticas;

Khaya grandifoliola apresentou o maior diâmetro à altura do peito (DAP) e a menor densidade. A variação da densidade básica é quase homogênea ao longo do fuste comercial, característica que indica a facilidade de trabalhabilidade da madeira para fabricação de móveis.

Referências Bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Densidade Básica da Madeira. Rio de Janeiro, 2003.

ALTGEN, M.; FRÖBA, M.; GURR, J.; KRAUSE, A.; OHLMEYER, M.; SAZAMA, U.; WILLEMS, W.; NOPENS, M. Limits in reaching the anhydrous state of wood and cellulose. **Cellulose**, v. 30, n. 5, p. 6247-6257, 2023.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. **Framework**: Crop-Livestock-Forest Integration (ILPF). 1. ed. Brasília: Embrapa, 2011. 130 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/923530/1/balbino01.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2024.

BAMBER, R. K.; HORNE, R.; GRAHAM-HIGGS, A. Effect of fast growth on the wood properties of *Eucalyptus grandis*. **Australian Forestry Research**, v. 12, n. 2, p. 163-167, 1982.

BEHLING, M.; MARTINEZ, G. B.; SILVA, A. R.; OLIVEIRA, T. K. DE.; CIPRIANI, H. N. *Eucalyptus* in crop-livestock-forest integration (ILPF) systems in the Amazon. In: OLIVEIRA, E. B.; PINTO JUNIOR, J. E. (Eds.). **Eucalyptus and Embrapa**: Four decades of research and development. Brasília, DF: Embrapa, 2021. cap. 29, p. 1044-1054.

BONFATTI JÚNIOR, E. A.; LENGOWSKI, E. C.; CABRAL, B. M.; OLIVEIRA, T. W. G.; BARROS, J. M. R.; OLIVEIRA, R. S.; ANDRADE, A. S.; KLOCK, U.; SILVA, D. A. Basic wood density, fiber dimensions, and wood chemical composition of four *Eucalyptus* species planted. **Revista Árvore**, v. 47, e4704, 2023.

BOX, G.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Society**, v. 26, p. 211-252, 1964.

BRASIL. Decreto nº 5.975, de 30 de novembro de 2006. Regulamenta os arts. 12, parte final, 15, 16, 19, 20 e 21 da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, o art. 4º, inciso III, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, o art. 2º da Lei nº 10.650, de 16 de abril de 2003, altera e acrescenta dispositivos aos Decretos nos 3.179, de 21 de setembro de 1999, e 3.420, de 20 de abril de 2000, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2006. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-006/2006/Decreto/D5975.htm#art32. Acesso em: 1 nov. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm. Acesso em: 1 nov. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.805, de 29 de abril de 2013. Institui a Política Nacional de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e altera a Lei nº 8.171, de 17 de janeiro de 1991. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2013. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12805.htm. Acesso em: 1 nov. 2023.

BRASIL-NETO, A. B.; BRASIL, N. M. Q. X.; ANDRADE, P. I. L.; SAMPAIO, A. C. F.; NORONHA, N. C.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, A. R. The commercial tree species *Dipteryx odorata* improves soil physical and biological attributes in abandoned pastures. **Ecological Engineering**, v. 160, n. 2, 106143, 2021.

CÂNDIDO, A. C. T. F.; MARTORANO, L. G.; CÂNDIDO, B. U. F.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C. T. S.; LISBOA, L. S. S.; FERNANDES, P. C. C.; SILVA, A. R.; DIAS-FILHO, M. B.; BELDINI, T. P. Infrared Thermal Profiles in Silvopastoral and Full-Sun Pastures in the Eastern Amazon, Brazil. **Forests**, v. 14, 1463, 2023.

CARAUTA, M.; GUZMÁN-BUSTAMANTE, I.; MEURER, K.; HAMPF, A.; TROOST, C.; RODRIGUES, R.; BERGER, T. Assessing the full distribution of greenhouse gas emissions from crop, livestock and commercial forestry plantations in Brazil's Southern Amazon. In: 30th INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ECONOMISTS. **Anais [...]**. Vancouver, 2018.

CHRISTOFORO, A. L.; COUTO, N. G.; ALMEIDA, J. P. B.; AQUINO, V. B. DE. M.; LAHR, F. A. R. Apparent density as an estimator of wood properties obtained in tests where failure is fragile. **Agricultural Engineering**, v. 40, n. 1, p. 105-112, 2020.

CORTES, J. P. S.; COUDEL, E.; PIRAUX, M.; SILVA, M. P.; SANTOS, B. A.; FOLHES, R.; SILVA, R. G. P. What are the perspectives of family agriculture in a context of agribusiness expansion? Participatory zoning with community representatives of the Plateau Santareno. **Franco-Brazilian Journal of Geography**, 45, 2020.

COSTA, D. C.; MARTORANO, L. G.; MORAES, J. R. S. C.; LISBOA, L. S. S.; STOLF, R. Temporal dynamics of the water footprint of soybean crops in a grain hub in western Pará, Amazon. **Environment and Water Journal**, v. 13, n. 5, e2051, 2018.

DIMOU, V.; TSALIKI, A.; KITIKIDOU, K. Radial and longitudinal density variations in *Abies cephalonica* and *Pinus halepensis*. **Journal of Forestry Research**, v. 34, p. 853-863, 2023.

DOWNES, G. M.; HUDSON, I. L.; RAYMOND, C. A.; DEAN, G. H.; MICHELL, A. J.; SCHIMLECK, R. **Sampling plantation *Eucalypts* for wood and fiber properties**. Hobart: CSIRO, 1997.

ELOY, E.; MANGINI, T. DE. S.; NARDINI, C.; CARON, B. O.; TREVISAN, R.; SANTOS, A. D. DOS. Correlation of anatomy with physical properties of wood species from an agroforestry system. **Tree Journal**, v. 48, n. 1, e4815, 2024.

FEARNSIDE, P. M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 90, n. 1, p. 59-89, 1997.

FERNANDES, P. C. C.; CHAVES, S. S. F.; MARTORANO, L. G. Crop-livestock-forest integration in the North region: soil carbon assessments at Fazenda Vitória in Paragominas, Pará. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. **ILPF: innovation with the interaction of crops, livestock and forestry**. Brasília, DF: Embrapa, 2019, p. 628-640.

FERREIRA, M. D.; DE MELO, R. R.; TONINI, H.; PIMENTA, A. S.; GATTO, D. A.; BELTRAME, B.; STANGERLIN, D. M. Physical-mechanical properties of wood from a *Eucalyptus* clone planted in an integrated crop-livestock-forest system. **International Wood Products Journal**, v. 11, n. 1, p. 2042-6453, 2019.

FRANÇA, T. S. F. A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; BARAUNA, E. E. P. Anatomical characteristics and physical-mechanical properties of wood from two species of African mahogany. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 633-640, 2015.

GENDVILAS, V.; NEYLAND, M.; ROCHA-SEPÚLVEDA, M. F.; DOWNES, G. M.; HUNT, M.; JACOBS, A.; WILLIAMS, D.; VEGA, M.; O'REILLY-WAPSTRA, J. Effects of thinning on the longitudinal and radial variation in wood properties of *Eucalyptus nitens*. **Forestry**, v. 95, p. 504-517, 2022.

GOMES, G. S. L.; CALDEIRA, M. V. W.; GOMES, R.; DUARTE, V. B. R.; MOMOLLI, D. R.; FARIA, J. C. T.; GODINHO, T. D. O.; TRAZZI, P. A.; SOBRINHO, L. S.; OLIVEIRA NETO, S. N. D.; SCHUMACHER, M. V. Biomass Production and Nutritional Sustainability in Different Species of African Mahogany. **Forests**, v. 15, n. 11, 1951, 2024.

GUERREIRO, Q. L. DE. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. DE; SANTOS, G. R. DOS; RUIVO, M. DE. L. P.; BELDINI, T. P.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, K. E. DA.; GUEDES, M. C.;

SANTOS, P. R. B. Spatial variability of soil physical and chemical aspects in a Brazil nut tree stand in the Brazilian Amazon. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 4, p. 237-250, 2017.

HERRERO-JÁUREGUI, C.; GUARIGUATA, M. R.; CÁRDENAS, D.; VILANOVA, E.; ROBLES, M.; LICONA, J. C.; NALVARTE, W. Assessing the extent of “conflict of use” in multipurpose tropical forest trees: a regional view. **Journal of Environmental Management**, v. 130, p. 40-47, 2013.

HONORIO-CORONADO, E. N.; BLANC-JOLIVET, C.; MADER, M.; GARCÍA-DÁVILA, C. R.; GOMERO, D. A.; DEL CASTILLO-TORRES, D.; FLORES-LLAMPAZO, G.; HIDALGO-PIZANGO, G.; SEBBENN, A. M.; MEYER-SAND, B. R. V.; PAREDES-VILLANUEVA, K.; TYSKLIND, N.; TROISPOUX, V.; MASSOT, M.; CARVALHO, C.; DE LIMA, H. C.; CARDOSO, D.; DEGEN, B. SNP markers as a successful molecular tool for assessing species identity and geographic origin of trees in the economically important South American legume genus *Dipteryx*. **Journal of Heredity**, v. 111, n. 4, p. 346-356, 2020.

HSING, T. Y.; PAULA, N. F.; PAULA, R. C. Dendrometric, chemical characteristics and basic density of wood from hybrids *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Forest Science**, v. 26, n. 1, p. 273-283, 2016.

LATREILLE, A. J.; WÜNSCH, D. G.; SOUZA, J. T.; TALGATTI, M.; SILVEIRA, A. G.; OLIVEIRA, L. H.; SANTINI, E. J. Physico-mechanical properties of wood *Dipteryx alata*, *Astronium graveolens*, *Bowdichia virgilioides* and *Eucalyptus grandis*. **Revista do Instituto Florestal**, v. 30, n. 2, p. 143-150, 2018.

LIMA, F. B. D.; SOUZA, Á. N. D.; MATRICARDI, E. A. T.; GASPAR, R. D. O.; LIMA, I. B. D.; SOUZA, H. J. D.; SANTOS, M. L. D.; MIGUEL, E. P.; BORGES, L. A. C.; SANTOS, C. R. C. D.; GOUVEIA, F. N.; LIMA, M. F. B. Alternative tree species for sustainable forest management in the Brazilian Amazon. **Forests**, v. 15, n. 10, 1763, 2024.

LONGO, M.; SAATCHI, S.; KELLER, M.; BOWMAN, K.; FERRAZ, A.; MOORCROFT, P. R.; LOBO, F. D.; RIBEIRO, G.; VINCENT, G. Impacts of degradation on water, energy, and carbon cycling of the Amazon tropical forests. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 125, n. 8, e2020JG005677, 2020.

MARTORANO, L. G.; PEREIRA, L. C.; NECHET, D. Climate typology of the state of Pará – Adaptation of the Koppen method. **Bulletin of Theoretical Geography**, v. 23, p. 45-46, 1993.

MARTORANO, L. G.; DE MORAES, J. R. DA. S. C.; SILVA, L. K. X.; FERNANDES, P. C. C.; AMARAL, J. M. DO; LISBOA, L. S.; NEVES, K. A. L.; PACHECO, A.; BELDINI, T. P.; APARECIDO, L. E. DE. O., DA SILVA, W. C.; GODINHO, V. DE. P. C. Agricultural and livestock production in the Amazon: A reflection on the necessity of adoption of integrated production strategies in the western region of the state of Para. **Australian Journal of Crop Science**, v. 15, n. 8, 1102-1109, 2021a.

MARTORANO, L. G.; SOARES, W. B.; MORAES, J. R. S. C.; NASCIMENTO, W.; APARECIDO, L. E. O.; VILLA, P. M. Climatology of Air Temperature in Belterra: Thermal Regulation Ecosystem Services Provided by the Tapajós National Forest in the Amazon. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 2, p. 327-337, 2021b.

MEDEIROS, T. K. A. DE; WADT, L. H. DE. O.; KAINER, K. A. Traditional knowledge of tree “bleeding” in brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) management. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, v. 59, e1858, 2024.

MOMOLLI, D. R.; CALDEIRA, M. V. W.; GOMES, G. S. L.; GOMES, R.; DUARTE, V. B. R.; GODINHO, T. D. O.; DA SILVA, J. G. M.; DOS SANTOS, V. B.; VIDAURRE, G. B.; FARIA, J. C. T.; SCHUMACHER, M. V.; PEREIRA, M. G. Stem Longitudinal Gradient for Basic Density, Carbon, Nitrogen, and CN Ratio in *Khaya* spp.: Improved Correlation Using Diameter Instead of Commercial Height. **Forests**, v. 15, n. 1923, p. 2-18, 2024.

MONTEIRO, A.; BARRETO-MENDES, L.; FANCHONE, A.; MORGAVI, D.P.; PEDREIRA, B. C.; MAGALHÃES, C. A. S.; ABDALLA, A. L.; EUGÈNE, M. Crop-livestock-forestry systems as a strategy for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing the sustainability of forage-based livestock systems in the Amazon biome. **Science of the Total Environment**, v. 906, 167396, 2024.

NWAOGU, C.; CHERUBIN, M. R. Chapter One - Integrated agricultural systems: The 21st-century nature-based solution to solve global FEEES challenges. **Advances in Agronomy**, v. 185, p. 1-73, 2024.

OLIVEIRA, L. Z.; ULLER, H. F.; KLITZKE, A. R.; ELEOTÉRIO, J. R.; VIBRANS, A. C. Towards the Fulfillment of a Knowledge Gap: Wood Densities for Species of the **Subtropical Atlantic Forest**. **Data**, v. 4, n. 3, 104, 2019.

PIMENTA, E. M.; RAMALHO, F. M. G.; DAMBROZ, G. B. V.; COUTO, A. M.; CAMPOE, O. C.; HEIN, P. R. G. Planting spacing and genotype affected tree growth and variation in wood density and lignin content along *Eucalyptus* trunks. **Industrial Crops and Products**, v. 222, 119595, 2024.

POORTER, L.; VAN DER SANDE, M. T.; THOMPSON, J.; ARETS, E.J.M.M.; ALARCÓN, A.; ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, J. et al. Diversity enhances carbon storage in tropical forests. **Global Ecology and Biogeography**, v. 24, n. 11, p. 1314-1328, 2015.

PRODES – MONITORING PROGRAM OF THE BRAZILIAN AMAZON FOREST BY SATELLITE **PRODES Amazônia**, 2024. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 5 nov. 2024.

RAMALHO, F. M. G.; PIMENTA, E. M.; GOULART, C. P.; ALMEIDA, M. N. F.; VIDAURRE, G. B.; HEIN, P. R. G. Effect of stand density on longitudinal variation of wood and bark growth in fast-growing *Eucalyptus* plantations. **iForest**, v. 12, p. 527-532, 2019.

REDE ILPF. **ICLF in Numbers: 2020/2021**, 2021. Disponível em: <https://redeilpf.org.br/ilpf-em-numeros/>. Acesso em: 5 nov. 2024.

REIS, C. A. F.; KALIL FILHO, A. N.; AGUIAR, A. V.; MORAES-RANGEL, A. C., Characterization of species belonging to the genus *Khaya* of interest in Brazil. In: REIS, C. A. F., OLIVEIRA, E. B., SANTOS, A. M. **African mahogany (*Khaya* spp.): current affairs and prospects for cultivation in Brazil**. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 13-49. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/202696/1/Mogno-Africano-08-10-2019.pdf>. Acesso em: 12 out. 2023.

REIS, J. C.; STACHETTI RODRIGUES, G.; DE BARROS, I.; RIBEIRO RODRIGUES, R. DE. A.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; KAMOI, M. Y. T.; MICHETTI, M.; WRUCK, F. J.; RODRIGUES-FILHO, S.; PIMENTEL, P. E. O.; SMUKLER, S. Integrated crop-livestock systems: A sustainable land-use alternative for food production in the Brazilian Cerrado and Amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, 124580, 2021.

REZENDE, M. A. DE.; ESCOBEDO, J. F. Volumetric shrinkage and apparent density of wood as a function of moisture. **IPEF**, v. 39, p. 33-40, 1988.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. The Cultivation of African Mahogany (*Khaya* spp.) and the Growth of Activity in Brazil. **Forest and Environment**, v. 24, e00076814, 2017.

ROCHA, S. M. G.; VIDAURRE, G. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALMEIDA, M. N. F.; CARNEIRO, R. L.; CAMPO, O. C.; SCOLFORO, H. F.; ALVARES, C. A.; NEVES, J. C. L.; XAVIERA, A. C.; FIGURA, M. A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, 118290, 2020.

ROMERO, F. M. B.; NOVAIS, T. N. O.; JACOBINE, L. A. G.; BEZERRA, E. B.; LOPES, R. B. DE. C.; DE HOLANDA, J. S.; REYNA, E. F.; FEARNSIDE, P. M. Basic wood density in large trees: Impacts on biomass estimates in the southwestern Brazilian Amazon. **Forests**, v. 15, n. 5, 734, 2024.

SANTANA, A. C.; SANTANA, Á. L.; SANTANA, Á. L.; OLIVEIRA, G. M. T. S.; SANTOS, M. A. S. Bioeconomic evaluation of an agroforestry system and the potential to recover degraded areas and capitalize producers in the state of Pará, Brazilian Amazon. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 61, p. 439-455, 2023.

SANTOS, L. H. O.; ALEXANDRE, F. S.; MENDOZA, Z. M. S. H.; SOUZA, E. C.; BORGES, P. H. M.; MARIANO, R. R.; DIAZ, L. M. G. R.; NUNES, C. A. Chemical and physical characteristics of African mahogany wood (*Khaya ivorensis* A. Chev.). **Nativa**, v. 8, n. 3, p. 361-366, 2020.

SANTOS, P. L.; SANTOS, E. A. A.; MAGALHÃES, M. R. R.; SANTOS, V. B.; BARAÚNA, E. E. P. Determination of extractives and basic density of wood *Brosimum lactescens* (S. Moore) C.C. Berg for productive purposes. In: EVANGELISTA W. V. **Native and planted wood from Brazil**: quality, research and current affairs. São Paulo: Editora Científica, 2021. p. 372-381.

SCHULZ, H. R.; GALLIO, E.; ACOSTA, A. P.; GATTO, D. A. Evaluation of physical properties of six forest wood species. **Journal Materia**, v. 25, n. 3, 2019.

SETTE JR., C. R.; DE OLIVEIRA, I. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; YAMAJI, F. M.; LACLAU, J. P. Effect of age and sampling position on wood density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.

SILVA, J. C. N.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; DANTAS, E. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S. Aggregation, carbon, and total soil nitrogen in crop-livestock-forest integration in the Eastern Amazon. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 22, n. 12, p. 837-842, 2018.

SILVA-NETO, P. A.; SILVA, J. S.; GOMES, L. F. Cumaru (*Dipteryx odorata*): scientific and technological prospecting. **Prospecting Notebooks**, v. 16, n. 1, p. 295-311, 2023.

SILVEIRA, J. G. D.; OLIVEIRA NETO, S. N. D.; CANTO, A. C. B. D.; LEITE, F. F. G. D.; CORDEIRO, F. R.; ASSAD, L. T.; SILVA, G. C. C.; MARQUES, R. D. O.; DALARME, M. S. L.; FERREIRA, I. G. M.; DA CONCEIÇÃO, M. C. G.; RODRIGUES, R. A. R. Land use, land cover change and sustainable intensification of agriculture and livestock in the Amazon and the Atlantic Forest in Brazil. **Sustainability**, v. 14, 2563, 2022.

SOUSA, W. C. S.; BARBOSA, L. J.; SOARES, A. A. V.; GOULART, S. L.; PROTÁSIO T. P. Wood colorimetry for the characterization of amazonian tree species: a subsidy for a more efficient classification. **Cerne**, v. 25, n. 4, p. 451-462, 2019.

SOUSA, B. C. M. DE; CASTRO, S. P. DE; LOURIDO, K. A.; KASPER, A. A. M.; PAULINO, G. DE. S.; DELARMELINA, C.; DUARTE, M. C. T.; SARTORATTO, A.; VIEIRA, T. A.; LUSTOSA, D. C.; BARATA, L. E. S. Identification of coumarins and antimicrobial potential of ethanolic extracts of *Dipteryx odorata* and *Dipteryx punctata*. *Molecules*, v. 27, n. 18, 5837, 2022.

SOUZA, J. P.; GONÇALVES, J. F. C.; JAQUETTI, R. K.; COSTA, K. C. P.; LIMA, R. M. B.; FEARNSSIDE, P. M.; NINA JUNIOR, A. R. Silvicultural interventions and agroforestry systems increase the economic and ecological value of *Bertholletia excelsa* plantations in the Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 97, 197-207. 2023a.

SOUZA, C. R.; BALDONI, A. B.; TONINI, H.; MAIA, V. A.; SANTOS, R. M.; LUVISON, M.; SANTOS, J. P. Ecological patterns and conservation opportunities with carbon credits in brazil nut groves: a study-case in the southeast amazon. **Cerne**, v. 29, e-103164, 2023b.

SOUZA, A. O.; SANTOS, A. R.; LOPES, S. F.; SOARES, T. R. Harvesting *Bertholletia excelsa* Bonpl. in a western Amazon rural community: local ecological knowledge and meaning to “nut-crackers”. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 19, n. 61, p. 2-12, 2023c.

SOUZA, I. M. D.; SAGRILO, E.; DE OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L.; ARAÚJO, M. D. M.; MUNIZ, L. C.; COSTA, J. B.; POMPEU, R. C. F. F.; DE SOUSA, D. C.; DE ANDRADE, H. A. F.; DE OLIVEIRA NETO, E. D.; CARVALHO LEITE, L. F. C.; BLANCO, F. F.; LIMA, P. S. D. C.; SOUZA, H. A. Chemical soil quality in integrated production systems with presence of native and exotic arboreal components in the eastern Brazilian Amazon. **Forests**, v. 15, n. 7, 1078, 2024.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM. **SAS**, 2023. Disponível em: Analytics Software & Solutions

https://www.sas.com/pt_br/home.html?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=branb-global&utm_content=GMS88251&gclid=CjwKCAjwmbqoBhAgEiwACIjzEOhrfkTsrsU0oCZYVFrnb3IxELsbqIQYh-HJGSrmiEctar0oVO-xoC5YAQAvD_BwE. Acesso em: 1 nov. 2023.

VIEIRA, D. S.; OLIVEIRA, M. L. R.; GAMA, J. R. V.; LAFETÁ, B. O. Perceptions about native chestnut trees in the Lower Tapajós River, state of Pará. **Nativa**, v. 10, n. 4, p. 449-457, 2022.

WADT, L. H. O.; MAROCCOLO, J. F.; GUEDES, M. C.; SILVA, K. E (EDS.). **Amazon nut: studies on the species and its value chain**: social, economic and organizational aspects. Brasília, DF: Embrapa, 2023. 352 p.

WARING, B.; NEUMANN, M.; PRENTICE, I. C.; ADAMS, M., SMITH, P., SIEGERT, M. Forests and decarbonization - Roles of natural and planted forests. **Frontiers in Forestry and Global Change**, v. 3, n. 8, 2020.

WASSENBERG, M.; CHIU, H. S.; GUO, W.; SPIECKER, H. Analysis of wood density profiles of tree stems: Incorporating vertical variations to optimize wood sampling strategies for density and biomass estimations. **Trees**, v. 29, p. 551-561, 2015.

WHEELER, E. A.; BAAS, P.; GASSON, P. E. International association of wood anatomists: list of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 3, p. 219-232, 1989.

ZHANG, S. Y.; REN, H.; JIANG, Z. Wood density and wood shrinkage in relation to initial spacing and tree growth in black spruce (*Picea mariana*). **Journal of Wood Science**, v. 67, n. 30, 2021.

6 CAPÍTULO IV

AJUSTE DE MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA E O CARBONO DO COMPONENTE FLORESTAL EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA⁵

⁵ O capítulo encontra-se de acordo com o Guia para elaboração e apresentação da produção acadêmica da Ufopa. Disponível em: <http://ufopa.edu.br/sibi/servicos-e-produtos/guia-de-normalizacao/>; e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

AJUSTE DE MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA E O CARBONO DO COMPONENTE FLORESTAL EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

RESUMO: O sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) tem se destacado como um modelo de produção sustentável, evidenciado por sua capacidade de combinar arranjos silviculturais com cultivos agrícolas nos primeiros anos e, posteriormente, com pastagens. Essa integração, além de promover o bem-estar animal, garante a prestação de serviços ambientais, especialmente em propriedades onde as pastagens apresentaram sinais de degradação. Este estudo teve como objetivo avaliar modelos matemáticos para identificar a equação alométrica com maior precisão para estimar biomassa e carbono em sistema ILPF na Amazônia Oriental. O material coletado após intervenção silvicultural na unidade de referência tecnológica que possui aproximadamente 7,0 ha em Mojuí dos Campos, Pará, onde foram testados modelos para as espécies *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*, plantadas em um espaçamento de 7 m x 5 m. Oitenta e cinco árvores com características indesejáveis foram amostradas destrutivamente, sendo coletado 425 discos de madeira de diferentes seções do tronco, bem como galhos e folhas, para determinar a biomassa e o carbono. Seis modelos foram testados usando o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total (Ht) como variáveis preditoras. Foram analisados os seguintes índices: coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro padrão de estimativa ($S_{yx\%}$), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), índice de concordância de Willmott (d) e análise gráfica de resíduos. O modelo de Spurr foi o mais eficiente, com $R^2_{aj.} = 0,92$, $S_{yx\%} = 26,27$ para biomassa, e $R^2_{aj.} = 0,92$, $S_{yx\%} = 32,05$ para carbono. Portanto, com 11 anos, o componente florestal armazenou em média 254,25 kg (92,12 kg. ha⁻¹) de biomassa e 120,00 kg (43,48 kg. ha⁻¹) de carbono. A espécie *K. grandifoliola* apresentou os maiores estoques de biomassa (454,21 kg) e carbono (227,07 kg). Concluiu-se que o sistema ILPF é eficiente em capturar e armazenar carbono, em plantios juvenis. As práticas silviculturais consolidam o sistema de produção pecuário, passivo de certificação por prestar importantes serviços ambientais, a partir da adoção de práticas sustentáveis na Amazônia brasileira.

Palavras chave: Modelagem. Serviços ambientais. Sistema de produção integrado. Espécies florestais.

ABSTRACT: The Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLF) system has emerged as a sustainable production model, highlighted by its ability to combine silvicultural arrangements with agricultural crops in the early years, followed by pastures. This integration not only promotes animal welfare but also ensures the provision of environmental services, especially on properties where pastures have shown signs of degradation. This study aimed to evaluate mathematical models to identify the most accurate allometric equation for estimating biomass and carbon in an ICLF system in the Eastern Amazon. The study was conducted following a silvicultural intervention at a technological reference unit of approximately 7.0 ha in Mojuí dos Campos, Pará. Models were tested for the species *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata*, and *Khaya grandifoliola*, planted at a spacing of 7 m x 5 m. Eighty-five trees with undesirable characteristics were destructively sampled, and 425 wood discs were collected from different trunk sections, along with branches and leaves, to determine biomass and carbon content. Six models were tested using diameter at breast height (DBH) and total height (Ht) as predictive variables. The following indices were analyzed: adjusted coefficient of determination ($R^2_{aj.}$), standard error of estimate ($S_{yx\%}$), Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC), Willmott's concordance index (d), and graphical analysis of residuals. The Spurr model was the most efficient, with $R^2_{aj.} = 0.92$, $S_{yx\%} = 26.27$ for biomass, and $R^2_{aj.} = 0.92$, $S_{yx\%} = 32.05$ for carbon. Therefore, with 11 years, the forest component stored an average of 254.25 kg (92.12 kg. ha⁻¹) of biomass and 120.00 kg (43.48 kg. ha⁻¹) of carbon. The species *K. grandifoliola* presented the highest stocks of biomass (454.21 kg) and carbon (227.07 kg). It was concluded that the ILPF system is efficient in capturing and storing carbon, in juvenile plantings. Silvicultural practices consolidate the livestock production system, passive of certification by providing important environmental services, starting from the adoption of sustainable practices in the Brazilian Amazon.

$S_{yx\%} = 32.05$ for carbon. After 11 years, the forest component stored an average of 254.25 kg (92.12 kg.ha⁻¹) of biomass and 120.00 kg (43.48 kg.ha⁻¹) of carbon. The species *K. grandifoliola* showed the highest biomass (454.21 kg) and carbon (227.07 kg) stocks. It was concluded that the ICLF system is efficient in capturing and storing carbon in juvenile plantations. Silvicultural practices strengthen the livestock production system, making it certifiable due to its provision of important environmental services through the adoption of sustainable practices in the Brazilian Amazon.

Keywords: Modeling. Environmental services. Integrated production system. Forest species.

6.1 Introdução

A Amazônia brasileira tem passado por intensos processos de mudanças no uso e cobertura do solo desde a década de 1960, principalmente devido à expansão de atividades agropecuárias extensivas, que incentivaram queimadas e desmatamentos. Até o final de 2023, a região havia perdido aproximadamente 20% de sua cobertura florestal original, cerca de 800.000 km² (INPE, 2024).

Além de reduzir os estoques de carbono, esses projetos comprometem a capacidade da floresta de atuar como sumidouro de carbono, um serviço essencial para mitigar as mudanças climáticas (KRUID et al., 2021). A assimilação de carbono é um serviço ambiental reconhecido pela Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), que incentiva práticas sustentáveis (BRASIL, 2021). Esse mecanismo varia de acordo com a espécie, taxa de crescimento, arranjo do sistema, interação entre espécies e as condições de solo e clima do local (FELICIANO et al., 2018).

Os primeiros estudos científicos no bioma Amazônia utilizaram equações alométricas para estimar a biomassa arbórea por métodos destrutivos foram realizados nos municípios de Manaus, no estado do Amazonas, e Tomé-Açu, no estado do Pará. Esses estudos estabeleceram relações quantitativas entre variáveis independentes, como altura da árvore e diâmetro à altura do peito (DAP), e a biomassa (HIGUCHI; CARVALHO-JÚNIOR, 1994; ARAÚJO; HIGUCHI; CARVALHO-JÚNIOR, 1999). Embora esses modelos forneçam uma base importante, ainda há uma lacuna significativa na aplicação desse conhecimento aos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), que apresentam maior diversidade de espécies e condições ambientais.

O sistema ILPF tem se destacado como uma solução promissora para diversificar a renda dos produtores por meio da venda de madeira e produtos florestais não madeireiros, também melhora o conforto térmico dos animais e acumula carbono na biomassa vegetal,

contribuindo para o sequestro de carbono (ALVES et al., 2019; LEITE et al., 2023). Além disso, áreas desmatadas na Amazônia, exploradas para pecuária como consequência de estratégias de ocupação territorial, precisam ser convertidas em sistemas mais eficientes. Essas áreas devem ser usadas para produzir alimentos dentro dos princípios de sustentabilidade ambiental, econômica e social em sistemas ILPF.

Torna-se, portanto, necessário desenvolver equações alométricas específicas para o sistema ILPF, considerando as diferentes espécies e suas interações. Esses modelos não apenas ajudariam a avaliar indicadores de participação do componente florestal (conjunto de árvores presentes no sistema ILPF), mas também a estimar biomassa e estoques de carbono, importantes para o cálculo da redução de gases de efeito estufa (GEE), base para políticas de mitigação das mudanças climáticas (SANQUETTA et al., 2020).

O Código Florestal Brasileiro permite a restauração florestal com espécies nativas em áreas de reserva legal e preservação permanente (BRASIL, 2012). O estudo de espécies florestais cultivadas na Amazônia será útil para a parametrização de projetos de restauração de vegetação, investimentos comerciais e compensação de carbono por meio de créditos de carbono, com base em modelos matemáticos de produção de biomassa e carbono.

Dado esse contexto, a questão norteadora foi: qual é o melhor modelo matemático que descreve a biomassa e o carbono do componente florestal cultivado em um sistema ILPF com 11 anos após sua implantação? Com a hipótese de que é possível utilizar uma equação alométrica baseada em variáveis dendrométricas para estimar biomassa e carbono acima do solo de árvores jovens em um sistema ILPF.

Portanto, o objetivo deste estudo é desenvolver e comparar equações alométricas para identificar a mais adequada na estimativa da biomassa e do carbono de árvores em um sistema ILPF.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Área de estudo

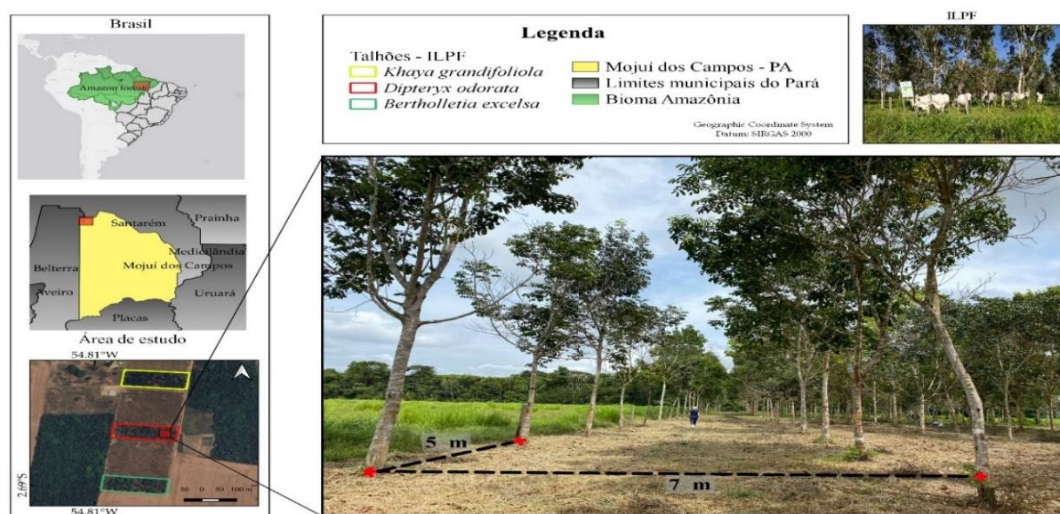
A área de estudo está em um sistema ILPF de 7,0 ha. O sistema faz parte de uma Unidade de Referência Tecnológica (URT), lote 389, sítio São Sebastião, localizado na fazenda Nossa Senhora Aparecida, no município de Mojuí dos Campos, Pará, nas coordenadas centrais 02°38'11" S e 54°56'13" W.

O clima da área é classificado como Am₃, de acordo com a classificação de Köppen adaptada por Martorano, Pereira e Nechet (1993). A precipitação média anual varia entre 2.000 e 2.500 mm, com temperatura média de 26,5°C (MARTORANO et al., 2021) e o tipo de solo predominante é o Latossolo Amarelo Distrófico (GUERREIRO et al., 2018). A vegetação predominante na região é a Floresta Ombrófila Densa, com árvores entre 25 m e 50 m de altura (IBGE, 2012).

O histórico da Unidade de Referência Tecnológica (URT), detalhado por Silva et al. (2018), demonstra sua evolução e consolidação como um sistema integrado pecuário-florestal, conforme descrito por Cândido et al. (2023). A implementação do sistema foi iniciada em fevereiro de 2010 com o plantio de *Glycine max*, cultivar BRS Tracajá (Soja). Durante a segunda adubação da *G. max*, foram semeados 20 kg.ha⁻¹ de sementes de *Brachiaria ruziziensis* (Capim) para a formação de pastagens.

Entre os anos de 2011 e 2013, o sistema foi enriquecido com o cultivo de *Zea mays*, cultivar BRS 1040 (Milho) e *Oryza sativa*, variedade Best (Arroz), em 2012 e 2013, todos consorciados com forragem e intercalados com o componente florestal. As espécies arbóreas *Bertholletia excelsa* (Castanha-da-Amazônia), *Dipteryx odorata* (Cumarú) e *Khaya grandifoliola* (Mogno africano) foram plantadas em oito fileiras com espaçamento de 7 m × 5 m. Cada talhão, com área total de 0,92 ha e contendo 33 árvores, foi intercalado por uma distância de 166 m entre si, destinada ao cultivo de culturas anuais e à formação de pastagens (Figura 20).

Figura 20 – Mapa e localização da área de estudo e disposição das árvores no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

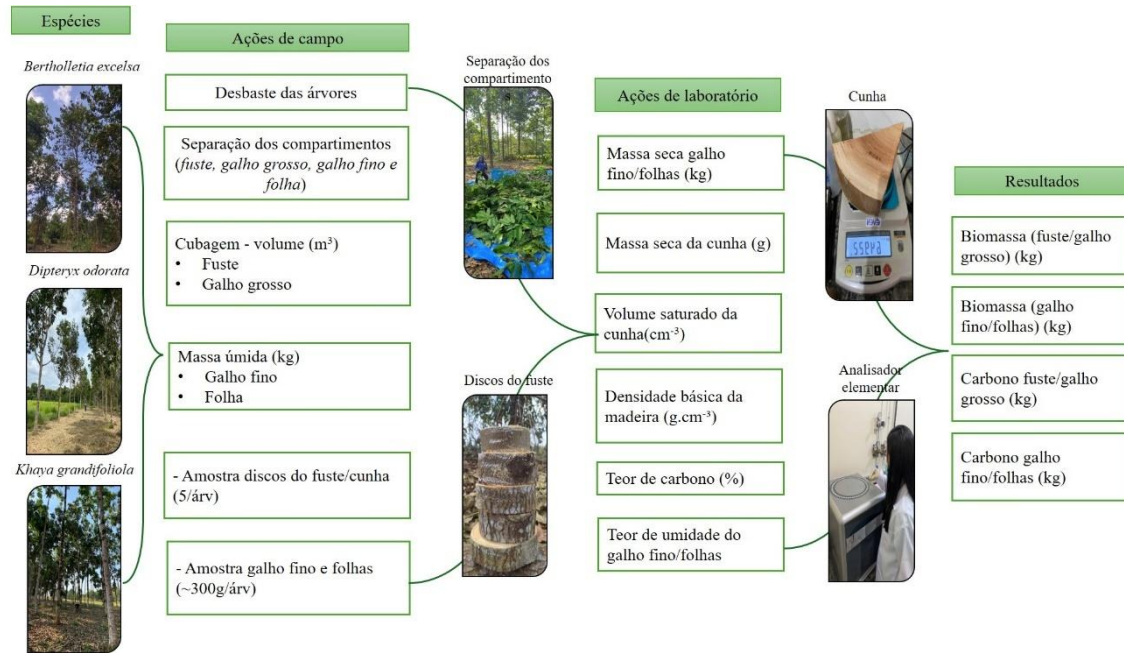


Fonte: SANTOS, 2024.

6.2.2 Coleta de dados

A coleta de dados para obter a biomassa e o carbono acima do solo presente no componente florestal ocorreu em duas etapas: ações de campo e de laboratório (Figura 21).

Figura 21 – Esquema metodológico para obtenção da biomassa e o carbono acima do solo presente no componente florestal do sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Fonte: SANTOS, 2024.

Nos talhões foram desbastadas e cubadas 30 árvores de *B. excelsa*, 25 árvores de *D. odorata* e 30 árvores de *K. grandifoliola*, selecionadas de forma aleatória, porém considerando a variabilidade diamétrica da população. Foram separados os compartimentos (fuste, galhos grossos, com circunferência > 6,0 cm, galhos finos, com circunferência ≤ 6,0 cm e folhas) e mensurados a massa úmida, *in loco*, da seguinte forma:

Os fustes foram cubados utilizando o método de Smalian, com sequência realizada em diferentes posições ao longo do tronco: 0 m, 0,3 m, 1,0 m, 1,3 m, 2,0 m e, subsequentemente, em intervalos de 1,0 m até a altura comercial, deixando um toco remanescente de aproximadamente 10 cm (Equação 1). Já os galhos grossos foram cubados pelo método de Huber, considerando circunferência no ponto médio do galho e seu comprimento total (Equação 2) (Tabela 9). Durante esse processo, também foram mensuradas a circunferência à altura de 1,30 m do solo (CAP), posteriormente convertida para diâmetro à altura do peito (DAP); a altura total (Ht); e a altura do fuste (Hf) de cada árvore, com o auxílio de uma fita métrica (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006).

Tabela 9 – Equações para obtenção do volume do fuste e do galho grosso do componente florestal presente no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

Nº	Nome	Abreviação	Equação
Eq.1	Volume do fuste	V_{fu}	$V_{fuste} = l * \left[\frac{S_1 + S_2}{2} \right]$
Eq.2	Volume do galho grosso	V_{gg}	$V_{galho\ grosso} = l * S_m$

Nota: V_{fu} : volume do fuste (m^3); l : comprimento da seção (m), S_1 and S_2 : áreas seccionais nas extremidades da seção de cubagem (m^2). V_{gg} : volume do galho grosso (m^3); S_m : área seccional do meio do galho grosso (m^2). **Fonte:** MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006.

Galhos finos e folhas foram organizados em um balde de 200 l e a massa úmida (em kg) foi medida usando uma balança digital de gancho com capacidade de 50 kg e precisão de 10 g.

Além disso, foram coletados e identificados cinco discos do caule de cada árvore cubada, com aproximadamente 5 cm de espessura, nas seguintes posições: 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (H_c), totalizando 425 discos (RAMALHO et al., 2019). Amostras de aproximadamente 0,3 kg relativas aos galhos finos e folhas de cada árvore, colocadas e identificadas em um saco de papel kraft de 2 kg. Esses materiais foram enviados ao Laboratório de Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal do Oeste do Pará (Ufopa), para serem processados e secos a 70°C em uma estufa até atingirem um peso constante. De cada disco foi extraída uma cunha de tamanho 1/8 para a obtenção da densidade básica da madeira (ρ básica), utilizando o método de imersão em água. A ρ básica de *B. excelsa* foi de 0,55 g. cm^{-3} , o de *D. odorata* foi de 0,83 g. cm^{-3} e o de *K. grandifoliola* foi de 0,51 g. cm^{-3} , valores utilizados nos cálculos de biomassa.

A biomassa dos troncos e dos galhos grossos foi calculada utilizando-se a densidade básica da madeira e o volume desses compartimentos (Equações 3 e 4). Para o cálculo da biomassa dos galhos finos e das folhas (Equações 5 e 6), foi utilizado o Teor de Umidade (TU), obtido a partir da relação entre a massa seca (M_s) das amostras e a massa úmida no campo (M_u), ambas em kg (Tabela 10).

O carbono presente em cada compartimento foi calculado pela multiplicação da biomassa pelo teor de carbono (Equação 7). É importante observar que o teor de carbono considerado para o galho grosso foi o mesmo obtido para o caule a partir da análise elementar. Assim, ao somar a biomassa e o carbono de cada compartimento, calcula-se a biomassa e o carbono acima do solo para cada árvore (Equações 8 e 9) (Tabela 10).

Tabela 10 – Equações para obter a biomassa acima do solo e o carbono do componente florestal do sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

Nº	Nome	Abreviação	Equação
Eq.3	Biomassa do fuste	W_{fuste}	$W_{fuste} = V_{fu} * \rho_{básica}$
Eq.4	Biomassa do galho grosso	$W_{galho\ grosso}$	$W_{galho\ grosso} = V_{gg} * \rho_{básica}$
Eq.5	Biomassa do galho fino	$W_{galho\ fino}$	$W_{galho\ fino} = TU_{gf} * M_{u\ gf}$
Eq.6	Biomass da folha	W_{folha}	$W_{folha} = TU_{folha} * M_{u\ leaf}$
Eq.7	Carbono presente no compartimento	C_{comp}	$C_{comp} = W_{comp} * TC_{comp}$
Eq.8	Total de biomassa acima do solo	W	$W = \Sigma W_{comp}$
Eq.9	Total de carbono acima do solo	C	$C = \Sigma C_{comp}$

Nota: W_{fuste} : biomassa do fuste (kg); V_{fu} : volume do fuste (m³); $\rho_{básica}$: densidade básica da madeira (g.cm⁻³). $W_{galho\ grosso}$: biomassa do galho grosso (kg); V_{gg} : volume do galho grosso (m³). $W_{galho\ fino}$: biomassa do galho fino (kg); $TU_{galho\ fino}$: teor de umidade do galho fino; $M_{u\ galho\ fino}$: massa úmida do galho fino (kg); W_{folha} : biomassa da folha (kg); TU_{folha} : teor de umidade da folha; $M_{u\ folha}$: massa úmida da folha (kg); C_{comp} : carbono presente em cada compartimento da árvore (kg); W_{comp} : biomassa do compartimento (kg); TC_{comp} : teor de carbono do compartimento (%). W : biomassa total acima do solo (kg); ΣW_{comp} : somatória da biomassa de cada compartimento (kg). C : carbono total acima do solo (kg); ΣC_{comp} : somatória do carbono dos compartimentos (kg). **Fonte:** SANTOS, 2024.

Para calcular o carbono na biomassa, primeiro foi necessário obter o teor de carbono presente em cada compartimento (TC_{comp}), onde foram utilizadas dez amostras de cada um dos seguintes compartimentos: fuste (cunha), galho fino e folha. As amostras foram submetidas ao método de combustão seca no analisador elementar vario MACRO cube, que detecta a quantidade percentual do teor de carbono de acordo com os pressupostos metodológicos descritos em (PONTE et al., 2019; SANTOS et al., 2023) (Tabela 11).

Tabela 11 – Teor de carbono (%) nos compartimentos das espécies *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* presente no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

Espécie	Teor de Carbono (%)		
	Fuste	Galho fino	Folha
<i>Bertholletia excelsa</i>	47,21	46,49	50,68
<i>Dipteryx odorata</i>	48,99	46,79	52,14
<i>Khaya grandifoliola</i>	49,01	45,79	47,58

Fonte: SANTOS et al., 2023.

6.2.3 Análise de dados

Foram obtidas estatísticas descritivas para as variáveis de biomassa e carbono das 85 árvores amostradas: máximo, mínimo, média ($\bar{X}$), desvio padrão (s^2) e coeficiente de variação

em porcentagem (CV%). Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965), à homocedasticidade de variância de White (WHITE, 1980) e ao teste de outlier de Bonferroni, ambos com 95% de probabilidade (Bonferroni, 1936). O teste de correlação de Pearson foi usado para avaliar a existência de uma correlação linear entre as variáveis analisadas do componente florestal (PEARSON, 1914). Seis modelos matemáticos foram ajustados para estimar a biomassa seca e o carbono acima do solo (Tabela 12). Esses modelos foram selecionados por serem frequentemente utilizados na modelagem de biomassa e carbono em árvores, utilizando as variáveis DAP e Ht como variáveis preditoras (FONTOURA et al., 2017; LOPES et al., 2023; FERREIRA; GOMES; SCHNEIDER, 2024; ROMERO et al., 2024).

Tabela 12 – Modelos matemáticos ajustados para estimar a biomassa e o carbono das árvores no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

Nº	Autor	Modelo
1	Linear	$Y = \beta_0 + \beta_1 * DBH + \varepsilon_i$
2	Spurr	$Y = \beta_0 + \beta_1 (DBH^2 * Ht) + \varepsilon_i$
3	Meyer	$Y = \beta_0 + \beta_1 * DBH + \beta_2 * DBH^2 + \beta_3 * DBH * Ht + \beta_4 * (DBH^2 Ht) + \beta_5 * Ht + \varepsilon_i$
4	Stoate (Australiana)	$Y = \beta_0 + \beta_1 * DBH^2 + \beta_2 * DBH^2 * Ht + \beta_3 * Ht + \varepsilon_i$
5	Naslund	$Y = \beta_0 + \beta_1 * DBH^2 + \beta_2 * DBH^2 * Ht + \beta_3 * DBH * HT^2 + \beta_4 * HT^2 + \varepsilon_i$
6	Schumacher-Hall linear	não $Y = \beta_0 * DBH^{\beta_1} * Ht^{\beta_2} * \varepsilon_i$

Nota: Y: biomassa total ou carbono (kg); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$: coeficientes de regressão; DAP: diâmetro à altura do peito, em cm; Ht: altura total, em m; ε_i : erro aleatório. **Fonte:** SANTOS, 2024.

A precisão das equações foi baseada no coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) (Equação 10) (SANQUETTA et al., 2023); erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{yx\%}$) (Equação 11) (SCOLFORO, 1993); significância dos parâmetros usando o teste t em um nível de probabilidade de 95%; critério de informação de Akaike (AIC) (Equação 12) (AKAIKE, 1974); critério de informação Bayesiano (Equação 13) (SCHWARZ, 1978); e a mediana do índice de concordância de Willmott (d) (Equação 14) (WILLMOTT, 1985). Além disso, foram realizadas análises gráficas dos resíduos padronizados (Equações 15 e 16) (SCOLFORO, 1993) (Tabela 13).

Tabela 13 – Índices estatísticos para análise de equações alométricas para estimativa de biomassa e carbono presentes no componente florestal no sistema ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

Nº	Nome	Abreviação	Equação	Interpretação
Eq.10	Coeficiente de determinação ajustado	$R^2_{aj.}$	$R^2_{aj.} = 1 - \left[\left(\frac{SQ_{res.}}{SQ_{total}} \right) * \left(\frac{(n-1)}{n-p} \right) \right]$	Quantifica a proporção da variação total dos dados explicado pelo modelo. Quanto mais próximo de 1, maior a capacidade explicativa.
Eq.11	Erro padrão da estimativa absoluto ∴ Erro padrão da estimativa em porcentagem	(S_{yx}) ∴ $(S_{yx\%})$	$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p-1}}$ ∴ $S_{yx\%} = \left(\frac{S_{yx}}{\bar{y}} \right) * 100$	S_{yx} mede a diferença média entre os valores observados e estimados, com valores mais baixos indicando um melhor ajuste do modelo. $S_{yx\%}$ reflete essa diferença média relativamente, mostrando que uma porcentagem menor é significativa.
Eq.12	Critério de informação de Akaike	AIC	$AIC = -2n * \left[\left(\frac{-n}{2} \right) \ln \left(\frac{SQ_{res.}}{n} \right) + 2p \right]$	Avalia a qualidade do ajuste de um modelo estatístico, levando em conta a precisão e a complexidade. Valores mais baixos indicam um melhor equilíbrio, penalizando a inclusão de variáveis desnecessárias.
Eq.13	Critério de Informação Bayesiano	BIC	$BIC = -2n * \left[\left(\frac{-n}{2} \right) \ln \left(\frac{SQ_{res.}}{n} \right) + \ln(n) * p \right]$	Ele avalia a qualidade do ajuste de um modelo, levando em conta sua adequação aos dados e sua complexidade, de forma mais rigorosa do que o AIC. Valores mais baixos de BIC indicam um modelo que explica bem os dados com menos variáveis.
Eq.14	Índice de concordância Willmott (d)	d	$d = 1 - \left[\left(\frac{(\sum_{i=1}^n P_i - O_i)^2}{(\sum_{i=1}^n P'_i + O'_i)^2} \right) \right]$	Quanto mais próximo de 1 for o índice “d”, maior será a concordância entre os dados observados e os estimados pelo modelo. A mediana de “d” foi comparada para cada universo de modelos, pois é uma medida de tendência central que é menos sensível a valores extremos.
Eq.15	Resíduo (%)	e_i	$e_i = [(\hat{y}_i - y_i) / y_i] * 100$	Representa a diferença percentual entre os valores observados e os previstos pelo modelo. Valores menores indicam um ajuste mais preciso do modelo, com as previsões mais próximas dos dados reais.
Eq.16	Resíduo padronizado	S_r	$S_r = e_i / S_{yx}$	Permite que a adequação do modelo seja avaliada. Valores próximos de zero indicam que as previsões são precisas. Valores extremos podem indicar valores discrepantes ou problemas com o ajuste do modelo.

Nota: $R^2_{aj.}$: coeficiente de determinação ajustado; $SQ_{res.}$: soma dos quadrados dos resíduos; SQ_{total} : soma total dos quadrados, n: total de observações; p: número de coeficientes do modelo; S_{yx} : erro padrão estimativa absoluto; y_i : biomassa seca observada ou carbono (kg); $\hat{y}_i$: biomassa seca estimada (kg) ou carbono estimado (kg); $S_{yx\%}$: erro padrão da estimativa em porcentagem; AIC: Critério de Informação de Akaike; ln: logaritmo neperiano; BIC:

Cr terio de Informação Bayesiano; d:  ndice de concordância de Willmott; P_i : valor estimado (simulado) pelo modelo; O_i : valor observado; P_i : valor da diferença de P_i pela média da variável analisada; O_i : diferença entre o valor observado e a m dia e e_i : resíduo em porcentagem; Sr : resíduos padronizados. **Fonte:** AKAIKE, 1974; SCHWARZ, 1978; WILLMOTT, 1985; SCOLFORO, 1993; SANQUETTA et al., 2023.

Todas as análises foram realizadas no ambiente R, usando os pacotes dplyr, faraway, whitestrap, MASS, car, gstat, ggcorrplot (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2023). A biomassa e o carbono observados foram comparados com os valores estimados usando o  ndice de concordância de Willmott (d).

6.3 Resultados e Discussão

Os resultados da análise das espécies florestais como um todo (componente florestal), mostraram um DAP médio de 22 cm, uma Ht média de 14,6 m e Hf média de 4,6 m. A biomassa e o carbono apresentaram médias de 257,5 kg e 124,7 kg, com desvio padrão de 236,4 kg e 115 kg, respectivamente, indicando grande heterogeneidade dentro do componente florestal, refletindo diferenças no crescimento e na capacidade de captura de carbono das espécies e  rvores (Tabela 14).

Tabela 14 – Estatísticas descritivas para as variáveis selecionadas das espécies florestais presentes no ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

Dados	Variável	Min	$\bar{X}$	Max	s^2	CV%
<i>Componente Florestal</i>	DAP (cm)	8,5	22,0	47,4	10,3	46,6
	Ht (m)	5,0	14,6	26,3	5,2	35,6
	Hf (m)	1,2	4,6	10,9	2,3	49,1
	W (kg)	21,9	257,5	929,4	236,4	91,8
	C (kg)	10,7	124,7	453,7	115,0	92,2
<i>Bertholletia excelsa</i>	DAP (cm)	10,6	19,9	36,8	6,4	32,4
	Ht (m)	8,1	14,7	21,6	3,7	25,1
	Hf(m)	3,2	5,7	9,9	1,9	32,9
	W (kg)	34,7	221,6	751,6	164,2	74,1
	C (kg)	16,4	105,3	356,8	78,0	74,1
<i>Dipteryx odorata</i>	DAP (cm)	8,5	13,1	19,1	3,0	22,8
	Ht (m)	5,0	9,1	14,7	2,4	26,0
	Hf(m)	1,6	2,9	4,0	0,7	22,9
	W (kg)	21,9	107,1	292,8	64,8	60,5
	C (kg)	10,7	52,5	143,5	31,8	60,5
<i>Khaya grandifoliola</i>	DAP (cm)	16,1	31,6	47,4	9,4	29,7
	Ht (m)	11,8	19,1	26,3	3,7	19,3
	Hf(m)	1,2	5,0	10,9	2,7	54,5
	W (kg)	61,2	418,8	929,4	289,3	69,1
	C (kg)	29,9	204,4	453,7	141,2	69,1

Nota: DAP (cm): diâmetro   altura do peito, em cm; Ht (m): altura total, em metros; Hf (m): altura do fuste, em metros; W (kg): biomassa, em quilogramas; C (kg): carbono, em quilogramas; Mín: valor mínimo; $\bar{X}$: média

aritmética; Máx: valor máximo; s^2 : desvio padrão; CV%: coeficiente de variação em porcentagem. **Fonte:** SANTOS, 2024.

As diferenças observadas no DAP entre as espécies *K. grandifoliola*, *B. excelsa* e *D. odorata* indicam diferentes capacidades de crescimento, com *K. grandifoliola* se destacando pelo maior DAP médio (31,6 cm), indicando seu potencial superior de acumulação de biomassa e carbono, características desejáveis em um sistema ILPF (STEPHENSON et al., 2014).

A variação no DAP, expressa pelo coeficiente de variação (CV%), foi maior em *B. excelsa* (32,4%) e menor em *D. odorata* (22,8%), o que expressa que *D. odorata* cresce de forma mais uniforme, apesar de ter apresentado menor crescimento em DAP frente as outras espécies florestais. A alta variabilidade dentro das espécies sugere práticas de manejo destinadas para a uniformidade, melhorando o potencial de sequestro de carbono (LAFLEUR et al., 2018).

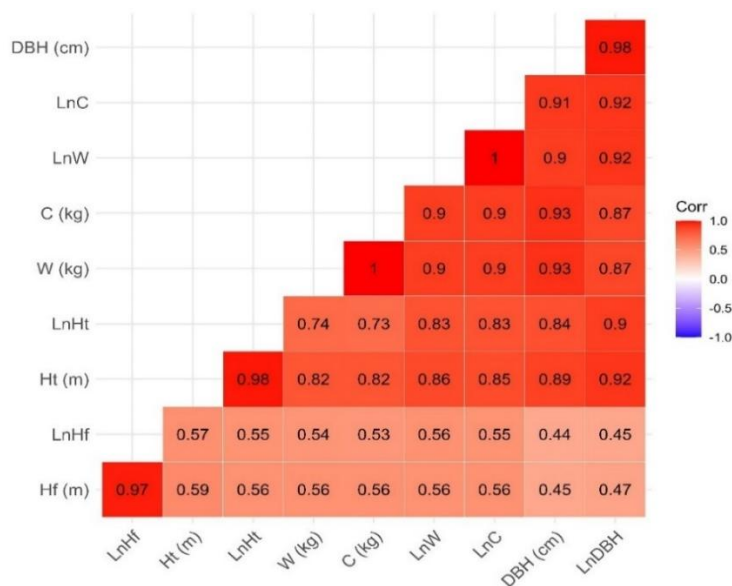
O manejo e o arranjo de planejamento influenciam o acúmulo de biomassa e carbono. Por exemplo, *B. excelsa* em Itacoatiara, no Estado do Amazonas, armazenou 16,1 t. ha⁻¹ de biomassa aos 8 anos, valor influenciado pelo espaçamento denso (LIMA; SOUZA, 2014; COSTA; LINHARES; FERREIRA, 2015).

No caso de *D. odorata*, o acúmulo de biomassa foi expressivo tanto em sistemas silvipastoris no Estado do Pará, onde a espécie acumulou 267,13 kg. árvore⁻¹ de biomassa e 13,36 t. ha⁻¹ de carbono aos 11 anos, quanto em florestas primárias na Amazônia Boliviana, com 860 kg. ha⁻¹ de biomassa e 420 kg. ha⁻¹ de carbono (LOPES et al., 2021; ROMERO et al., 2024).

Para *K. grandifoliola*, estudos em Gana indicaram que o acúmulo de biomassa foi menor em monocultivo do que em consórcio com outras espécies (OPUNI-FRIMPONG et al., 2013), descobrindo que arranjos de plantio variados podem ser mais eficazes na otimização do sequestro de carbono.

Observa-se uma forte correlação ($r > 0,80$) entre as variáveis dendrométricas, DAP e altura total (Ht), obtidas para o ajuste matemático, e as variáveis dependentes de biomassa (W) e carbono (C): (DAP ~ W: $r = 0,87$), (DAP ~ C: $r = 0,87$), (Ht ~ W: $r = 1,0$), (Ht ~ C: $r = 0,90$) (Figura 22).

Figura 22 – Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis obtidas dos componentes florestais presentes no ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Nota: DAP (cm): diâmetro na altura do peito; LnC: logaritmo neperiano do carbono; LnW: logaritmo neperiano da biomassa; C (kg): carbono em quilogramas; W (kg) biomassa; LnHt: logaritmo neperiano da altura total; Ht (m): altura total em metros; LnHf: logaritmo neperiano da altura do fuste; Hf (m): altura do fuste; LnDBH: logaritmo neperiano do diâmetro na altura do peito. **Fonte:** SANTOS, 2024.

A alta correlação positiva entre DAP e Ht com biomassa e carbono, com valores maiores que 0,80, demonstra a adequação dessas variáveis em modelos matemáticos, devido à sua relação linear significativa (SILVA et al., 2015). Árvores com maiores DAP e Ht acumulam mais biomassa e carbono, uma vez que o fuste concentra a maior parte da biomassa (WINK et al., 2018). Em um sistema silvipastoril, foi encontrada forte correlação entre DAP e biomassa em *D. odorata* ($r = 0,97$) (LOPES et al., 2021). Para a espécie mais utilizada em ILPF, *Eucalyptus grandis*, a madeira é a principal contribuinte para biomassa e carbono, apresentando relação direta com DAP (SILVA et al., 2015).

Quanto aos coeficientes e as estatísticas de ajuste dos modelos utilizados para estimar a biomassa arbórea, os maiores valores de $R^2_{aj.}$, superiores a 0,9, e os menores valores de $S_{yx\%}$, inferiores a 28,0, foram observados para os modelos 2, 3, 4, 5 e 6. No entanto, apenas os modelos 2 e 6 apresentam significância estatística para todos os coeficientes ($\alpha = 0,05$). Considerando os critérios AIC e BIC, o modelo 2 foi identificado como o melhor ajuste aos dados, pois apresentou os menores valores para esses indicadores. Além disso, o modelo 2 apresentou um alto índice de concordância (d), igual a 0,98 (Tabela 15).

Tabela 15 – Coeficientes e estatísticas dos modelos ajustados para biomassa acima do solo do componente florestal implantado em ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

Nº	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R^2_{aj}	S_{yx}	$S_{yx\%}$	AIC	BIC	d
1	-205,25*	22,24*	-	-	-	-	0,86	88,29	34,29	762,87	764,96	0,99
2	68,02*	0,02*	-	-	-	-	0,92	67,64	26,27	718,38	720,48	0,98
3	-150,01	32,77*	-0,85*	-0,60	0,04*	-3,54	0,92	66,05	25,65	718,15	721,05	0,99
4	41,60	0,02	0,02*	2,15	-	-	0,92	68,16	26,47	721,60	723,99	0,98
5	62,42*	0,23	-0,01	0,04	-0,51	-	0,92	67,35	26,15	720,52	723,13	0,98
6	0,25*	1,48*	0,79*	-	-	-	0,91	70,02	27,19	968,50	978,20	0,98

Nota: *Indica que são altamente significativos em $\alpha=0,05$. **Fonte:** SANTOS, 2024.

No que se refere aos coeficientes e as estatísticas dos modelos ajustados para a estimativa do carbono aéreo das árvores, os modelos com os melhores indicadores estatísticos foram: modelo 2 ($R^2_{aj} = 0,92$; $S_{yx\%} = 32,05$; AIC = 591,41; BIC = 593,51). Esses resultados foram corroborados pelo índice de concordância de Willmott (d), com um valor de 0,99 (Tabela 16).

Tabela 16 – Coeficientes e estatísticas dos modelos ajustados para o carbono do componente florestal implantado no ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.

Nº	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R^2_{aj}	S_{yx}	$S_{yx\%}$	AIC	BIC	d
1	-99,39*	10,92*	-	-	-	-	0,86	34,30	42,78	639,79	641,89	0,98
2	32,36*	0,01*	-	-	-	-	0,92	25,70	32,05	591,41	593,51	0,99
3	-75,09	16,34*	-0,42*	-0,32	0,02*	-1,58	0,93	25,07	31,27	591,05	593,95	0,99
4	22,75	0,01	0,01*	0,79	-	-	0,92	25,94	32,36	594,95	597,34	0,98
5	31,62*	0,11	-0,00	0,02	-0,26	-	0,92	25,62	31,95	593,75	596,37	0,98
6	0,12*	1,50*	0,79*	-	-	-	0,96	33,47	13,00	856,20	866,00	0,98

Nota: *Indica que são altamente significativos em $\alpha=0,05$. **Fonte:** SANTOS, 2024.

A eficiência dos modelos de dupla entrada em comparação aos modelos de entrada única pode ser atribuída à inclusão da variável Ht, que resulta em estimativas mais precisas e menos tendenciosas (CYSNEIROS et al., 2017). Guerreiro et al. (2021) validaram o uso do modelo

Schumacher-Hall para o gênero *Eucalyptus* em florestas plantadas no sudeste do Brasil. Isso se deve ao uso combinado do DAP e do Ht da árvore, o que melhora significativamente a precisão das estimativas.

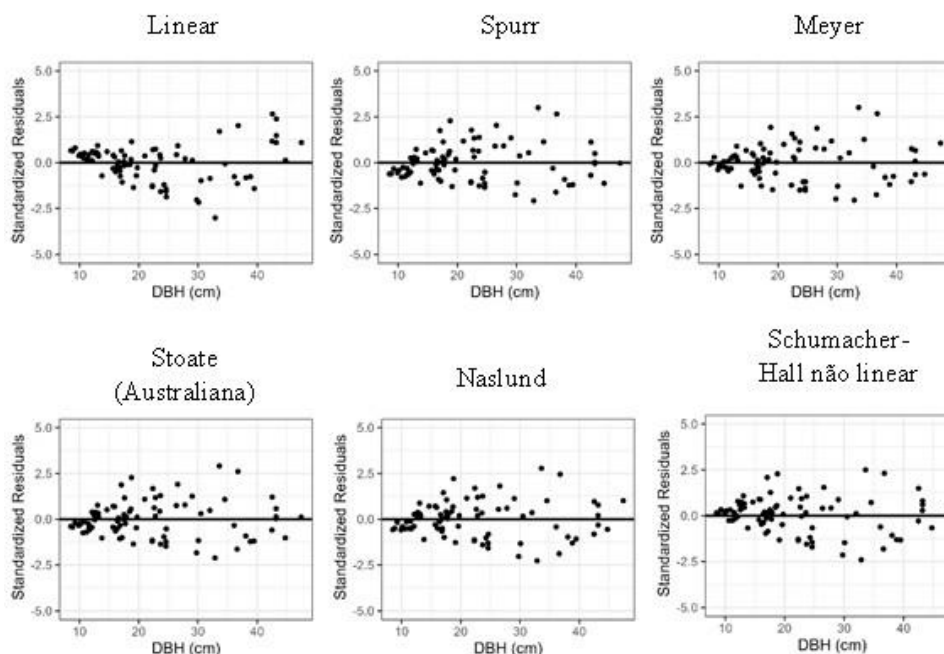
Além disso, a precisão das estimativas é ainda mais evidente em plantações silviculturais, que por apresentarem menor diversidade e permitirem a visualização completa do fuste e da copa, facilitam a obtenção da altura, variável crucial para a estimativa da biomassa. Isso porque árvores com o mesmo DAP podem ter alturas diferentes, influenciando nas estimativas de biomassa (ROLIM et al., 2018).

Os modelos Spurr e Schumacher-Hall não linear apresentaram coeficientes significativos, o que indica que as variáveis independentes do modelo, como DAP e Ht, explicam significativamente as variações de biomassa e carbono. O modelo Spurr se destaca pela alta precisão na estimativa de biomassa e carbono, sendo considerado parcimonioso, ou seja, um modelo simples e robusto com pouca ou nenhuma multicolinearidade entre as variáveis preditoras (COUTO; BASTOS, 1987). Pode-se notar também que o modelo Spurr dá maior peso ao diâmetro, e quando elevado ao quadrado, corrige parcialmente problemas de superestimação devido à sua forte correlação com a biomassa (CYSNEIROS et al., 2017).

Em contrapartida, o modelo não linear Schumacher-Hall apesar de apresentar indicadores estatísticos satisfatórios, é matematicamente mais complexo e sensível a erros de medição e outliers nas variáveis independentes, o que pode impactar negativamente a precisão das estimativas de biomassa (REZENDE et al., 2006). Assim, enquanto o modelo Spurr oferece uma combinação vantajosa de simplicidade e precisão, o modelo não linear Schumacher-Hall requer maior cautela devido à sua complexidade e sensibilidade às variações dos dados.

A análise gráfica dos resíduos padronizados apresenta os resultados mais homogêneos com as menores dispersões para os modelos Spurr e Schumacher-Hall não linear. Embora tenha havido uma tendência sutil de subestimação da biomassa para as árvores de menor diâmetro, para as árvores de maior diâmetro, no intervalo entre 30 cm e 48 cm, houve um maior equilíbrio entre os erros superestimados e subestimados (Figura 23).

Figura 23 – Distribuição gráfica residual dos modelos de entrada simples e dupla ajustados para estimar a biomassa acima do solo do componente florestal plantado em ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Fonte: SANTOS, 2024.

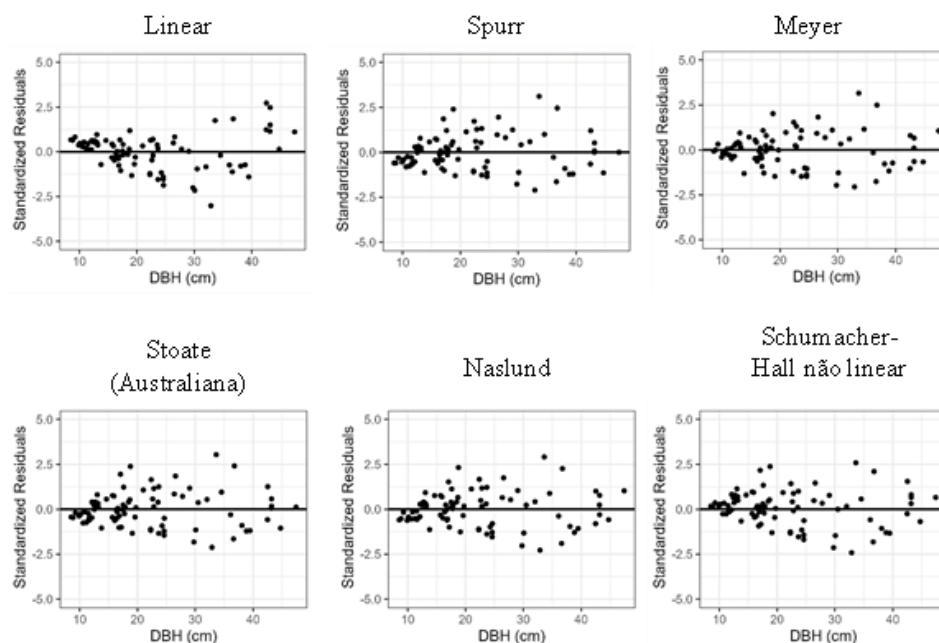
Ressalta-se que ambos os modelos apresentaram resíduos próximos ao eixo das abcissas, destacando-se o modelo Spurr pela menor amplitude de erro. A análise gráfica valida o modelo Spurr como o mais adequado para estimar a biomassa acima do solo, pois apresenta alto coeficiente de determinação ajustado, baixo erro padrão de estimativa e distribuição de resíduos com pouco viés em torno da reta de regressão.

Quanto aos gráficos de dispersão dos resíduos padronizados para as equações ajustadas para estimar o carbono, os modelos Spurr e Schumacher-Hall não linear, cujos indicadores estatísticos de qualidade de ajuste foram melhores, apresentaram distribuições de resíduos semelhantes, especialmente para árvores com DAP acima de 30 cm. Modelos que consideram mais de uma variável dendrométrica para prever biomassa e carbono tendem a fornecer estimativas mais precisas (TRAUTENMULLER et al., 2019; TRAUTENMULLER et al., 2023) (Figura 24).

Além disso, a equação ajustada pelo modelo Spurr destacou-se pelo desempenho superior em relação aos demais modelos, apresentando distribuição mais uniforme dos erros ao longo da linha zero e menor tendência à superestimação do carbono em árvores maiores, embora essa tendência seja sutil. Os modelos Spurr e Schumacher-Hall não linear apresentaram viés reduzido em torno da linha de regressão para árvores menores na faixa de 8,5 cm a 13 cm

de DAP, embora essa categoria represente a minoria dos dados. Portanto, o modelo Spurr foi selecionado como o mais adequado para estimar o carbono, dado seu menor viés em relação à linha de regressão e a distribuição mais homogênea dos resíduos, demonstrando sua eficácia em comparação aos demais modelos.

Figura 24 – Distribuição gráfica residual dos modelos de entrada simples e dupla ajustados para estimar o carbono acima do solo do componente florestal plantado em ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Fonte: SANTOS, 2024.

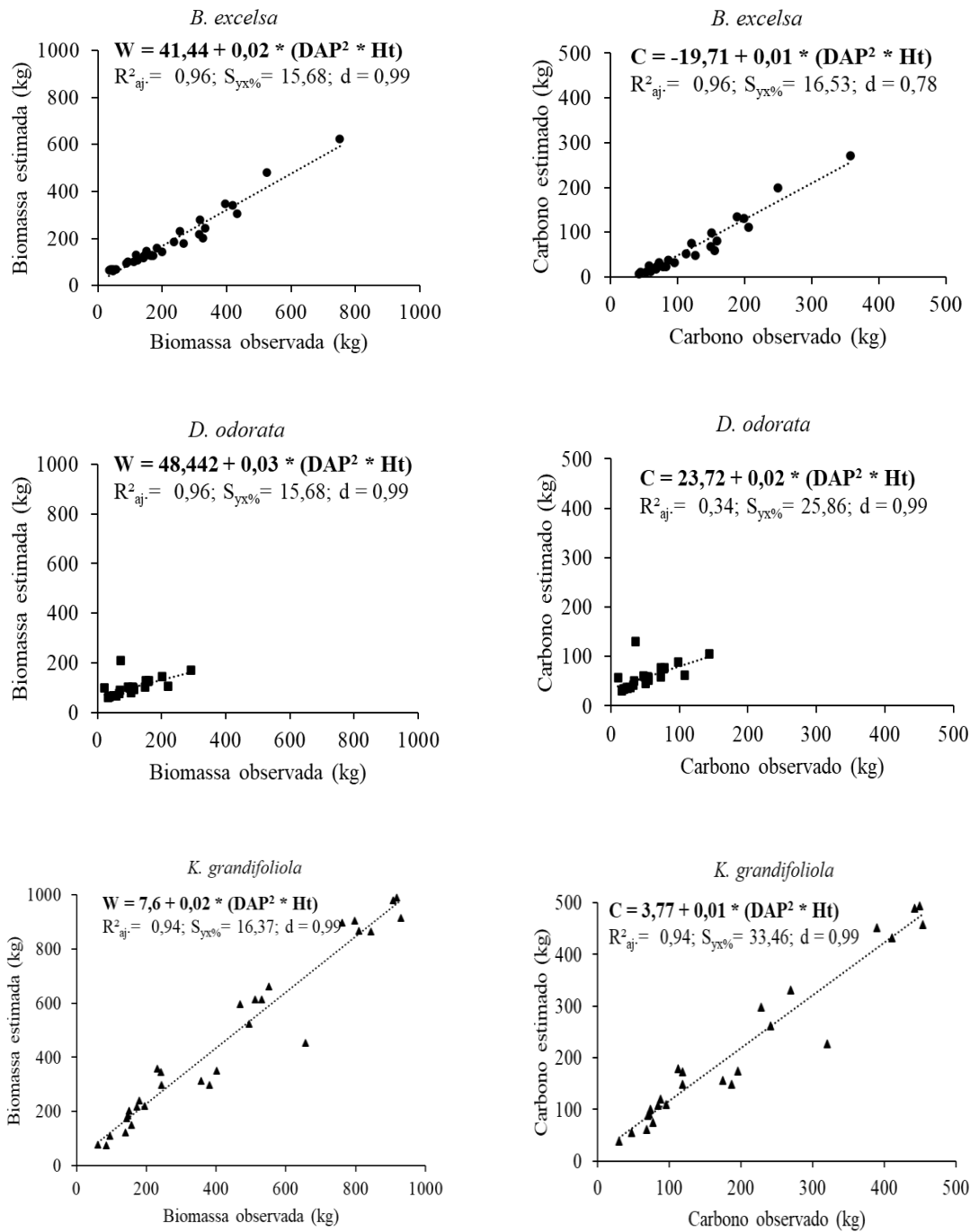
As equações para estimativa de biomassa e carbono, em kg, são as seguintes: $W = 68,023 + 0,017 \cdot (DAP^2 \cdot Ht)$ e $C = 32,363 + 0,008 \cdot (DAP^2 \cdot Ht)$. Com base nos valores médios das variáveis predictoras, DAP e Ht, apresentados na Tabela 3, o componente florestal (85 árvores) do sistema ILPF acumulou uma média de 254,25 kg (ou 92,12 kg. ha⁻¹) de biomassa, com $R^2_{aj.} = 0,92$; $S_{yx\%} = 26,27$ e 120,00 kg (ou 43,48 kg. ha⁻¹) de carbono, com $R^2_{aj.} = 0,92$ e $S_{yx\%} = 32,05$.

Ao aplicar a equação de Spurr para a estimativa de biomassa e carbono acima do solo por espécie, observou-se que *B. excelsa* apresentou uma média de 186,17 kg de biomassa e 52,66 kg de carbono. Já *D. odorata* acumulou, em média, 101,34 kg de biomassa e 58,99 kg de carbono, enquanto *K. grandifoliola* estocou 454,21 kg de biomassa e 227,07 kg de carbono, em média.

Quanto aos valores observados e estimados, notou-se que não houve diferença significativa entre eles, de acordo com o índice de Willmott ($d > 0,78$), tanto para biomassa

quanto para carbono. Esses resultados validaram a aplicação da equação de Spurr para as espécies testadas em condições de solo e clima semelhantes às da região da área de estudo (Figura 25).

Figura 25 – Representação gráfica dos valores observados de biomassa e carbono e estimados pelo modelo de Spurr, das espécies florestais presente no ILPF, Mojuí dos Campos, Pará.



Fonte: SANTOS, 2024.

A espécie *K. grandifoliola* se destaca como espécie prioritária para maximizar o estoque de biomassa e carbono em curto prazo, enquanto *B. excelsa* agrega valor tanto em termos de estoque de carbono, quanto em benefícios econômicos pela produção de castanhas, reforçando sua importância socioeconômica e ecológica no sistema ILPF (OLIVEIRA et al., 2024). *D. odorata* apesar de ter apresentado menor biomassa e carbono, se destaca pela qualidade de sua madeira, que apresenta alta resistência e durabilidade (LOPES et al., 2023).

O modelo de Spurr em sistemas diversificados como o ILPF é vantajosa, pois simplifica a estimativa de biomassa em arranjos que combinam espécies com diferentes taxas de crescimento e morfologias. Os modelos de dupla entrada têm demonstrado eficiência na estimativa de biomassa e carbono em diferentes espécies e sistemas florestais em áreas de restauração florestal (MIRANDA; MELO; SANQUETTA, 2011; LOPES et al., 2023).

O volume da madeira também pode ser estimado pelo modelo de Spurr. Lameira et al. (2022) ao ajustarem modelos volumétricos para *D. odorata* na sua área de estudo, aos 9 anos de idade, encontraram coeficientes estatísticos satisfatórios para estimar o volume comercial utilizando o modelo de Spurr ($R^2_{aj.} = 0,89$ e $S_{yx\%} = 18,55$). Entretanto, os autores recomendaram a utilização do modelo de Husch, que apresentou coeficientes estatísticos eficientes e utilizou apenas o DAP em sua fórmula matemática.

Em um sistema agroflorestal localizado no município de São Luís, Maranhão, composto por 17 espécies arbóreas com DAP maior que 10 cm e 6 anos de idade, foram estocados $18,39 \pm 20,43$ t. ha⁻¹ de carbono. Desse total, 83% do estoque de carbono foi detectado em três espécies principais, *Schizolobium amazonicum*, *Anacardium occidentale* e *Handroanthus* sp., mostrando seu alto potencial de sequestro de carbono em comparação com árvores em sucessão natural, que apresentaram um estoque de apenas $1,38 \pm 2,15$ t. ha⁻¹ de carbono (CELENTANO et al., 2020).

Em área de manejo florestal no município de Almerim, Pará, espécies nativas da Amazônia, como *Goupia glabra* (Cupiúba), *Dinizia excelsa* (Angeim vermelho) e *Qualea paraensis* (Mandioqueira escamosa), apresentaram biomassa média do caule de 6,27 t. árvore⁻¹ e carbono médio de 0,86 t. árvore⁻¹, com DAP médio de 0,86 m e Ht médio de 39,64 m, com base em 10 amostras de cada espécie (LIMA et al., 2019). Esses dados evidenciam a importância das espécies nativas no sequestro de carbono e na sustentabilidade das florestas amazônicas.

Com base nas informações analisadas, percebe-se que o sistema de ILPF tem papel fundamental na mitigação de gases de efeito estufa (GEE) por meio do estoque de carbono, ao mesmo tempo em que contribui para a melhoria das condições ambientais nos sistemas

pecuários (MARIA et al., 2017). No Estado do Pará, onde se localiza a área de estudo, o estoque de carbono pode ser fonte de benefício econômico ou ambiental, seja por meio de pagamento monetário direto ou compensação vinculada a certificados de redução de emissões por desmatamento e degradação, conforme estabelecido pela Lei nº. 9.781/2022 (SEMAS, 2022).

Embora entenda-se a importância do estudo da biomassa total da árvore, incluindo o sistema radicular, o presente trabalho considerou apenas a biomassa e o carbono acima do solo, uma vez que esse componente representa a maior parte da árvore e a obtenção dos dados é facilitada. Este enfoque é particularmente relevante no contexto da avaliação do estoque de carbono e dos benefícios econômicos e ambientais associados.

6.4 Conclusão

O sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta tem alto potencial de produção de biomassa e estoque de carbono acima do solo, como indicam as espécies nativas (*Bertholletia excelsa* e *Dipteryx odorata*) e a exótica (*Khaya grandifoliola*), cultivadas na Amazônia Oriental, com 11 anos de implantação.

O modelo linear de Spurr é o mais adequado para estimar a biomassa e o carbono das espécies florestais presente no ILPF, a partir da intervenção silvicultural de desbaste para a análise destrutiva, apresentando eficientes coeficientes estatísticos, como elevados coeficientes de determinação ajustado e baixo erro padrão da estimativa, comprovando sua precisão e robustez.

As equações alométricas desenvolvidas com base no modelo de Spurr constituem uma ferramenta valiosa para avaliar o potencial de sequestro de carbono em sistemas de ILPF, promovendo uma abordagem prática e confiável para mensurar a contribuição do componente arbóreo em sistemas integrados. Entre as espécies analisadas, a exótica *K. grandifoliola* destacou-se como a maior armazenadora de biomassa e carbono, reforçando sua importância como um elemento estratégico na prestação de serviços ambientais, em particular no sequestro de carbono atmosférico.

Dessa forma, os resultados deste estudo consolidam o modelo de Spurr como uma ferramenta essencial para estimativas precisas de biomassa e carbono em sistemas agroflorestais, além de oferecer subsídios científicos para práticas sustentáveis de manejo e para a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação das mudanças climáticas. O uso combinado de espécies nativas e exóticas em sistemas ILPF contribui para o aumento da resiliência, produtividade e sustentabilidade ambiental desses sistemas na região amazônica.

Referências Bibliográficas

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.

ALVES, F. V.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; KARVATTE JUNIOR, N. Bem-estar animal e ambiência na ILPF. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. DE.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (Ed.). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. cap. 15, p. 208-223.

ARAÚJO, T. M.; HIGUCHI, N.; CARVALHO-JÚNIOR, J. A. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Pará, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 117, p. 43-52, 1999.

BONFERRONI, C. E. Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilità. **Pubblicazioni del R Istituto Superiore di Scienze Economiche e Commerciali di Firenze**, v. 8, p. 3-62, 1936.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm. Acesso em: 1 nov. 2023.

BRASIL. Lei nº. 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nºs 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14119.htm. Acesso em: 15 jun. 2024.

CÂNDIDO, A. C. T. F.; MARTORANO, L. G.; CÂNDIDO, B. U. F.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C. T. S.; LISBOA, L. S. S.; FERNANDES, P. C. C.; SILVA, A. R.; DIAS-FILHO, M. B.; BELDINI, T. P. Infrared Thermal Profiles in Silvopastoral and Full-Sun Pastures in the Eastern Amazon, Brazil. **Forests**, v. 14, n. 7, 1463, 2023.

CELENTANO, D.; ROUSSEAU, G. X.; PAIXÃO, L. S.; BLOURENÇO, F.; CARDOZO, E. G.; RODRIGUES, T. O.; SILVA, H. U.; MEDINA, J.; SOUSA, T. M.; ROCHA, A. E.; REIS, F. O. Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 94, p. 1781-1792, 2020.

COSTA, K. C. P.; LINHARES, A. C. C.; FERREIRA, M. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de uma plantação de *Bertholletia excelsa* Bonpl. **Scientia Forestalis**. v. 43, n. 107, p. 591-600, 2015.

COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. Modelos de equações de volume e relações hipsométricas para plantações de *Eucalyptus* no Estado de São Paulo. **IPEF**, v. 37, p. 33-44, 1987.

CYSNEIROS, V. C.; PELISSARI, A. L.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SOUZA, L. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 295-304, 2017.

FELICIANO, D.; LEDO, A.; HILLIER, J.; NAYAK, D. R. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 254, p. 117-129, 2018.

FERREIRA, A. J. S.; GOMES, J. M.; SCHNEIDER, C. R. Volume equations for *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. in a silvopastoral system. **Scientific Electronic Journal Interdisciplinary Teaching**, v. 10, n. 32, p. 94-103, 2024.

FONTOURA, M. R.; CARON, B. O.; ELOY, E.; RÔMULO TREVISAN, R.; JONATHAN WILLIAM TRAUTENMÜLLER, J. W.; BEHLING, A. Modelos alométricos para estimativa de biomassa em área de regeneração natural de *Ateleia glazioviana* Baill. **Forest**, v. 47, p. 469-478, 2017.

GUERREIRO, Q. L. DE. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. DE.; SANTOS, G. R. DOS; RUIVO, M. DEL. P.; BELDINI, T. P.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, K. E. DA.; GUEDES, M. C.; SANTOS, P. R. B. Spatial variability of soil physical and chemical aspects in a Brazil nut tree stand in the Brazilian Amazon. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, p. 237-250, 2018.

GUERREIRO, S. F.; SARTORI, A. A. C.; BARBOSA, F. T.; KASPARY, R. M.; MARTINS, M. S.; MARCHIORI, L. M. Estimates of biomass and carbon in a planted forest by Schumacher & Hall method: a case study. **Journal of Agribusiness and the Environment**, v. 14, n. 2, e8818, 2021.

HIGUCHI, N.; CARVALHO-JÚNIOR, J. A. Biomass and carbon content of Amazonian tree species. In: SEMINAR ON CO₂ EMISSIONS AND SEQUESTRATION: a new business opportunity for Brazil. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Vale do Rio Doce Company, 1994.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro, 2012. 271 p.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento por satélite do desmatamento na floresta amazônica brasileira**, 2024. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 16 jun. 2024.

KRUID, S.; MACEDO, M. N.; GORELIK, S. R.; WALKER, W.; MOUTINHO, P.; BRANDO, P. M.; CASTANHO, A.; BACCINI, A.; COE, M. T. Beyond Deforestation: carbon emissions from land grabbing and forest degradation in the Brazilian Amazon. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, p. 1-10, 2021.

LAFLEUR, B.; FENTON, N. J.; SIMARD, M.; LEDUC, A.; PARÉ, D.; VALERIA, O.; BERGERON, Y. Ecosystem management in paludified boreal forests: enhancing wood production, biodiversity, and carbon sequestration at the landscape level. **Forest Ecosystems**, v. 5, n. 27, p. 2-14, 2018.

LAMEIRA, M. K. S.; SILVA, H. K. M.; GOMES, K. M. A.; CÂNDIDO, A. C. T. F.; MARTORANO, L. G.; SILVA-RIBEIRO, R. B.; SILVA, A. R.; GAMA, J. R. V. Capacidade produtiva de *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. em um sistema de produção de pecuária integrada no Baixo Amazonas, Brasil. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 19, n. 44, p. 56-65, 2022.

LEITE, F.; NÓBREGA, G.; BAUMGARTNER, L.; ALECRIM, F.; DA SILVEIRA, J.; CORDEIRO, R.; RODRIGUES, R. Greenhouse gas emissions and carbon sequestration associated with Integrated Crop-Livestock-Forestry (IILPF). **Environmental Reviews**, v. 31, n. 4, p. 2-43, 2023.

LIMA, R. M. B.; SOUZA, C. R. **Spacing recommendation for the production of Brazil nut wood (*Bertholletia excelsa* Humb. et Bonpl.) for plantations in altered areas in the Amazon.** Manaus. Technical Communication: Embrapa Amazonia Occidental, 2014. p. 1-8. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1007851/1/ComTec110.pdf>.

Acesso em: 27 jul. 2024.

LIMA, R. C.; SOTTA, E. D.; RAMOS, M. B. B.; SILVA, B. M. S.; APARÍCIO, P. S.; SANTOS, Y. K. S. Equations for estimating volume, biomass and carbon for three native Amazonian species, cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.), red angelim (*Dinizia excelsa* Ducke) e scaly cassava (*Qualea paraensis* Ducke). **Scientific Archives Journal**, v. 2, n. 2, p. 74-82, 2019.

LOPES, L. C. A.; SANTOS, A. J. M.; BACKES, C.; SILVA, L. L.; MAGALHÃES, A. F. Desenvolvimento florestal em sistema integrado lavoura-pecuaria-floresta. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n.11, p. 7-17, 2021.

LOPES, L. S. S.; PAULETTO, D.; GOMES, E. S. C.; SILVA, A. F.; OLIVEIRA, T. G. S.; SILVA, J. A. G.; BALONEQUE, D. D.; MARTORANO, L. G. Dendrometric relationships and Biomass in commercial plantations of *Dipteryx* spp. in the Eastern Amazon. **Forests**, v. 14, n. 11, 2167, 2023.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. *Dendrometry*. second edition. Guarapuava: Unicentro, 2006. 316 p.

MARIA, L. S.; OLIVEIRA, P. P. G.; SILVA, M.; YAMASHITA, O. M. Contribution of Crop-Livestock-Forest Integration (ILPFI) systems to carbon sequestration. **Espacios Magazine**, v. 38, n. 31, 2017.

MARTORANO, L. G.; PEREIRA, L. C.; NECHET, D. Climate typology of the state of Pará – Adaptation of the Koppen method. **Bulletin of Theoretical Geography**, v. 23, p. 45-46, 1993.

MARTORANO, L. G.; SOARES, W. B.; MORAES, J. R. S. C.; NASCIMENTO, W.; APARECIDO, L. E. O.; VILLA, P. M. Climatology of Air Temperature in Belterra: Thermal Regulation Ecosystem Services Provided by the Tapajós National Forest in the Amazon. **Brazilian Journal of Meteorology**, v. 36, n. 2, p. 327-337, 2021.

MIRANDA, D. L. C.; MELO, A. C. G.; SANQUETTA, C. R. Equações alométricas para estimativa de biomassa e carbono em árvores de reflorestamentos de restauração. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 679-689, 2011.

OLIVEIRA, S. S.; DA COSTA, K. C. P.; DE LIMA, R. M.; NINA JUNIOR, A. R.; DE CARVALHO, J. C.; NUNES-NESI, A.; ARAÚJO, W. L.; GONÇALVES, J. F. C. *Bertholletia excelsa* saplings respond to seasonal precipitation variations by changing metabolism when fertilized with NPK in different planting systems. **Forest Ecology and Management**, v. 572, 122325, 2024.

OPUNI-FRIMPONG, E.; OPOKU, S. M.; STORER, A. J.; BURTON, A. J.; YEBOAH, D. Productivity, pest tolerance and carbon sequestration of *Khaya grandifoliola* in the dry semi-deciduous forest of Ghana: a comparison in pure stands and mixed stands. **New Forests**, v. 44, n. 6, p. 863-879, 2013.

PEARSON, K. On the probability that two independent distributions of frequency are really samples of the same population, with special reference to recent work on the identity of trypanosome strains. **Biometrika**, v. 10, p. 85-143, 1914.

PONTE, M. R.; GADELHA, A. M. T.; MACHADO, Y. L.; LOPES, A. A. S.; MALVEIRA, J. Q.; MAZZETTO, S. E.; LOMONACO, D.; RIOS, M. A. S. Blends of sugarcane bagasse, mango and cashew prunings: characterization of properties and investigation of their energy potential. **Magazine Journal**, v. 24, n. 2, e-12372, 2019.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing, 2023. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 27 jul. 2024.

RAMALHO, F. M. G.; PIMENTA, E. M.; GOULART, C. P.; ALMEIDA, M. N. F.; VIDAURRE, G. B.; HEIN, P. R. G. Effect of stand density on longitudinal variation of wood and bark growth in fast-growing *Eucalyptus* plantations. **iForest**, v. 12, p. 527-532, 2019.

REZENDE, A. V.; VAEL, A. T.; SANQUETTA, C. R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; FELFILI, J. M. Comparison of mathematical models to volume, biomass and carbon stock estimation of the woody vegetation of a cerrado sensu stricto in Brasília, DF. **Scientia Forestalis**, v. 71, p. 65-76, 2006.

ROLIM, S. G.; ORELLANA, E.; PIOTTO, D.; VISMARA, E. S. Biometric models for silvicultural plantations with multiple species in the Atlantic Forest of northern Espírito Santo. In: ROLIM, S.G. (Eds.). **Silviculture and Technology of Atlantic Forest Species**. Belo Horizonte, MG: Publisher Rona, 2018. 160 p.

ROMERO, F. M. B.; FERREIRA-NETO, J. A.; SILVA, Z. A. G. P. G.; JACVINE, L. A. G.; VELASQUEZ, S. I. S.; ROMERO, R. A. B.; RIBEIRO, S. C.; SOUZA, G. S. A.; ISBAEX, C.; LOPES, R. B. C.; FERREIRA, F. M.; FEARNside, P. M. Volume, biomass, and carbon estimates for commercial tree species in a managed forest: A case study in the Bolivian Amazon. **Forests**, v. 15, n. 652, p. 2-20, 2024.

SANQUETTA, C. R.; BASTOS, A. S.; SANQUETTA, M. N. I.; ROSÁRIO, P. H. C. K.; DALLA CORTE, A. P.; PIVA, L. R. O. Biomass and carbon stocks in cultivated pastures in northern Rondônia. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 102-107, 2020.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; WATZALAWICK, L. F. **Forest inventories**: planning and execution. Curitiba: Multi Graphic. 4 ed., 2023. 406 p.

SANTOS, L. E.; MARTORANO, L. G.; SILVA, A. R.; GAMA, J. R. V. Carbon content in leaves, branches and stems of *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl., *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. and *Khaya grandifoliola* C. DC. in integrated systems in the eastern Brazilian Amazon. **DELOS: Sustainable Local Development**, v. 16, n. 43, p. 910-923, 2023.

SCHWARZ, G. Estimating the dimensional of a model. **Annals of Statistics**, v. 6, n. 2, p. 461-464, 1978.

SCOLFORO, J. R. **Forest measurement 3**: quantitative relationships in volume, weight and the hypsometric relationship. Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 150 p.

SEMAS – SECRETARIAT OF STATE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **Law nº. 9,781 of December 27, 2022; amends State Law nº. 9,048 of April 29, 2020, which establishes the State Policy on Climate Change of Pará (PEMC/PA)**. Belém, PA, 2022. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/legislacao/files/pdf/212496.pdf>. Acesso em: 2 mai. 2024.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; CARVALHO, S. P. C.; PICCOLO, M. C.; RODRIGUEZ, L. C. E. Carbon stock in aboveground forest biomass in commercial *Eucalyptus* spp. plantations. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 135-146, 2015.

SILVA, J. C. N.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; DANTAS, E. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S. Aggregation, carbon, and total soil nitrogen in crop-livestock-forest integration in the Eastern Amazon. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 22, n. 12, p. 837-842, 2018.

STEPHENSON, N. L.; DAS, A. J.; CONNORS, B.; MANTEGNA, F. B.; FANG, J.; BIEDERMANN, J. A.; FRANKLIN, J. F. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. **Nature**, v. 507, n. 7490, p. 90-93, 2014.

TRAUTENMULLER, J. W.; PÉLLICO-NETO, S. P.; BALBINOT, R.; CORTE, A. P. D.; BORELLA, J. Path analysis applied to evaluation of biomass estimates in subtropical forests of Brazil. **Forest**, v. 49, n. 3, p. 587-596, 2019.

TRAUTENMULLER, J. W.; KRUCHELSKI, S.; BALBINOT, R.; RUTHES, B. E. S.; CORTE, A. P. D.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A. Correlations between dendrometric and allometric variables of *Eucalyptus benthamii* under agroforestry systems in the subtropic of Brazil. **Advances in forestry Science**, v. 10, n. 3, p. 2043-2051, 2023.

WHITE, H. A. Heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. **Econometrica**, v. 48, n. 4, p. 817-838, 1980.

WILLMOTT, C. J.; AKLESON, G. S.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

WINK, C.; LANGE, A.; ARAÚJO, K. Z.; ALMEIDA, A. P. S.; BEHLING, M.; WRUCK, F. J. Biomass and nutrients of *Eucalyptus* cultivated in an agrosilvopastoral system. **Native Journal**, v. 6, n. special, p. 754-762, 2018.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciam a relevância do sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) como uma prática sustentável capaz de mitigar os impactos ambientais gerados por décadas de aumento do desmatamento e uso intensivo do solo na Amazônia brasileira. A análise dos índices morfométricos, teor de carbono, densidade da madeira, estoque de biomassa e carbono das espécies *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola* revelou diferenças significativas em termos de crescimento, armazenamento de biomassa e carbono, refletindo as especificidades de cada espécie e a capacidade de desenvolvimento na Unidade de Referência Tecnológica (URT) em sistema ILPF.

K. grandifoliola se destacou como a espécie com maior aporte de biomassa e estoque de carbono, demonstrando o potencial dessa espécie em sistemas ILPF quanto ao indicador de provisão madeireiro e regulação climática pela captura de carbono, reforçando a funcionalidade do sistema na prestação de serviço ambiental na propriedade rural. Por outro lado, *B. excelsa* apresentou características que favorecem a cobertura do solo, proteção ambiental e o fornecimento de frutos e sementes. *D. odorata* evidenciou a importância de ajustes no manejo para melhorar seu desempenho, haja vista que foi a espécie com menor crescimento, sinalizando como prestação de serviço ambiental a provisão de produtos não madeireiro, com as sementes que possuem alto valor econômico na fase juvenil no sistema ILPF. Como *D. odorata* foi a espécie com maior densidade da madeira, ao longo do tempo esses plantios florestais tendem a agregar valor pelo alto potencial madeireiro. Essas diferenças reforçam a necessidade de práticas de manejo específicas, baseadas nas características das espécies e suas interações com o ambiente.

Uma das maiores contribuições desta Tese foi o ajuste de modelos alométricos com base em dados de campo. As estimativas de biomassa e carbono apontam alta precisão, contribuindo para a formulação de estratégias de manejo e políticas públicas para ampliar os sistemas de produção que apontam indicadores de sustentabilidade como os apresentados neste trabalho. A utilização de práticas silviculturais, como o desbaste seletivo, revelou-se fundamental para melhorar a qualidade dos povoamentos e potencializar a prestação de serviços ambientais. Tais práticas são essenciais para atender às demandas atuais de sustentabilidade e para promover a certificação de serviços ambientais prestados pelo sistema ILPF, principalmente na região amazônica.

O sistema integração ILPF é uma alternativa viável para enfrentar desafios históricos de distúrbios ambientais na Amazônia, como o desmatamento e a pecuarização intensiva. Além de contribuir para a recuperação de áreas degradadas, o sistema permite aliar produtividade agrícola e conservação ambiental, fortalecendo a conectividade ecológica e os ciclos biogeoquímicos na região.

Os resultados da Tese reforçam a importância do sistema ILPF na Amazônia como um modelo de produção sustentável, com potencial para se tornar um pilar central na transição para uma economia de baixo carbono. O avanço das pesquisas voltadas à valorização ambiental, à certificação dos serviços ambientais e à melhoria contínua no manejo integrado das pastagens é essencial para consolidar o sistema como uma solução viável. Essas iniciativas representam um caminho importante para promover o desenvolvimento sustentável na Amazônia brasileira, equilibrando a conservação ambiental com a produtividade econômica e o bem-estar social.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, F. V.; KARVATTE JR., N. Bem-estar animal e ambiência na ILPF. In: BUNGENSTAB, D. J et al. **ILPF: Inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019, 835 p.
- ALVES, L. L. M.; ANGELO, H.; ALMEIDA, A. N.; SILVA, G. F.; MATRICARDI, E. A. T.; NUNES, A.; SOUZA JÚNIOR, C. V. N. Strategic Analysis of the Forest Carbon Market in Brazil. **Sustainability**, v. 16, 6898, 2024.
- AMBROSI, I.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; ZOLDAN, S. M. Lucratividade e risco de sistemas de produção de grãos combinados com pastagens de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 1213-1219, 2001.
- ARAUJO, E. C. G.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; PELISSARI, A. L.; ORSO, G. A.; SILVA, T. C. Global review and state-of-the-art of biomass and carbon stock in the Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 331, p. 117251, 2023.
- ARNOLD, R. J. *Khaya senegalensis*: current use from its natural range and its potential in Sri Lanka and elsewhere in Asia. In: PROSPECTS FOR HIGH-VALUE HARDWOOD TIMBER PLANTATIONS IN THE 'DRY' TROPICS OF NORTHERN AUSTRALIA. **Anais [...]**. Mareeba: Queensland, 2004.
- ARTAXO, P. Mudanças climáticas: caminhos para o Brasil: a construção de uma sociedade minimamente sustentável requer esforços da sociedade com colaboração entre a ciência e os formuladores de políticas públicas. **Ciência e Cultura**, v. 74, n. 4, 2022.
- ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; CORDEIRO, L. A. M.; EVANGELISTA, B. A. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. de; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (Ed.). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. cap. 11, p. 153-167.
- ASSIS, T. O.; AGUIAR, A. P. D.; RANDOW, C. V.; NOBRE, E. C. A. Projections of future Forest degradation and CO₂ emissions for the Brazilian Amazon. **Science Advances**, v. 8, eabj3309, 2022.
- AZEVEDO, C. M. B. C. de; SILVA, A. R.; ALVES, L. W. R.; FERNANDES, P. C. C.; CARVALHO, E. J. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, M. C. M. de. Desempenho do mogno-africano (*Khaya ivorensis*) e do milho em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta na Amazônia Oriental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS. **Anais [...]**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2011.
- AZEVEDO, M. L.; TITONI, M.; MACHADO, E. L. M.; ASSIS JÚNIOR, S. L.; FREITAS, E. C. S. Influência do ácido indolbutírico no enraizamento de miniestacas caulinar e foliar de mogno-africano (*Khaya grandifoliola* C. DC.). **Ciência Florestal**, v. 31, n. 2, p. 898-919, 2021.

BAALMAN, P.; WHITE, M. **302 GHC accounting for forest and other land use projects [online]**. GHG Institute, 2014. Disponível em: <http://ghginstitute.org/product/301-ghg-accounting-for-forest-inventories/>. Acesso em: 01 nov. 2023.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. **Framework: Crop-Livestock-Forest Integration (ILPF)**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2011. 130 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/923530/1/balbino01.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2024.

BALONEQUE, D. D.; PAULETTO, D.; LOPES, L. S. S.; RODE, R.; OLIVEIRA, T. G. S. Variáveis morfométricas de quatro espécies florestais em sistema silvipastoril no município de Belterra, Pará. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 3, p. 1-13, 2022.

BECKER, B. K. Geopolítica da Amazonia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 71-86, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF: MAPA/ACS, 2012.

BRASIL. Lei n. 12.805, de 29 de abril de 2013. Institui a Política Nacional de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e altera a Lei n. 8.171, de 17 de janeiro de 1991. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 30 abr. 2013.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Terceira comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima. **Diário oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2016. Disponível em: https://repositorio.mcti.gov.br/bitstream/mctic/4312/1/2016_terceira_comunicacao_nacional_brasil_convencao_quadro_nacoes_unidas_sobre_mudanca_clima_sumario_executivo.pdf. Acesso em: 01 nov. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano setorial para adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030: plano operacional. **Diário oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF: MAPA/DEPROS, 2021.

BRIANEZI, D.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; CASTRO, R. V. O.; BASSO, V. M. Equações alométricas para estimativa de carbono em árvores de uma área urbana em Viçosa – MG. **Revista Árvore**, v. 37, p. 1073-1081, 2013.

CAMPELO, N. R.; COELHO, G. T. C. P. Mogno africano (*Khaya grandifoliola*) no Brasil - uma revisão de literatura. **Revista Maestria**, v. 18, p. 59-66, 2023.

CÂNDIDO, A. C. T. F.; MARTORANO, L. G.; CÂNDIDO, B. U. F.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C. T. S.; LISBOA, L. S. S.; FERNANDES, P. C. C.; SILVA, A. R.; DIAS-FILHO, M. B.; BELDINI, T. P. Infrared Thermal Profiles in Silvopastoral and Full-Sun Pastures in the Eastern Amazon, Brazil. **Forests**, v. 14, 1463, 2023.

CARMONA, I. N.; AQUINO, M. G. C.; ROCHA, D. I. S.; SILVA, J. J. N.; FICAGNA, A. G.; BALONEQUE, D. D.; OTAKE, M. Y. F.; PAULETTO, D. Variáveis morfológicas de três espécies florestais em Sistema agroflorestal. **Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 131-144, 2018.

CARVALHO, P. E. R. Cumaru-Ferro *Dipteryx odorata*. **Comunicado Técnico Embrapa**, n. 225, ISSN 1517-5030, 2009.

CARVALHO, P. E. R. Castanha-da-Amazônia: *Bertholletia excelsa*. **Comunicado Técnico Embrapa**, v. 5, 2014.

CARVALHO, T. S.; DOMINGUES, E.P. Projeção de um cenário econômico e de desmatamento para a Amazônia Legal Brasileira entre 2006 e 2030. **Nova Economia**, v. 26, n. 2, p. 585-621, 2016.

CASAROLI, D.; ROSA, F. O.; ALVES JÚNIOR, J.; EVANGELISTA, A. W. P.; BRITO, B. V.; PENA, D. S. Aptidão edafoclimática para o Mogno-africano no Brasil. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 357-368, 2018.

CJB – CONSERVATOIRE ET JARDIN BOTANQUES DE LA VILLE DE GENÈVE AND SOUTH AFRICAN NATIONAL BIODIVERSITY INSTITUTE. **African Plant Database**. Pretoria, 2012. Disponível em: <http://www.ville-gech/musinfo/bd/cjb/africa>. Acesso em: 30 out. 2023.

COLLARES, D. G. **Castanha-do-Brasil**: uma alternativa de reflorestamento. Embrapa Florestas, 2006. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/17988458/castanha-do-brasil-uma-alternativade-reflorestamento>. Acesso em: 01 nov. 2023.

CONDÉ, T. M.; LIMA, M. L. M.; LIMA NETO, E. M.; TONINI, H. Morfometria de quatro espécies florestais em sistemas agroflorestais no município de Porto Velho, Rondônia. **Revista Agro@mbiente**, v. 7, n. 1, p. 18-27, 2013.

COSLOVSKY, S. V. **Como a Bolívia Dominou o Mercado Global de Castanha-do Brasil?** Amazônia 2030, 2021. Disponível em: <https://amazonia2030.org.br/como-a-bolivia-dominou-o-mercado-global-de-castanha-do-brasil/>. Acesso em: 01 nov. 2023.

DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 410-416, 2011.

DE FACCIO CARVALHO, P. C.; PONTES, L. S.; BARRO, R. S.; SIMÕES, V. J. L. P.; DOMINSCHKE, R.; CARGNELUTTI, C. S.; MAURÍCIO, R. M.; JOSÉ, J. F. B. S.; BREMM, C. Integrated crop-livestock-forestry systems as a nature-based solution for sustainable agriculture. **Agroforestry Systems**, v. 98, p. 2309-2323, 2024.

DIAS-FILHO, M. B. Recuperação de pastagens degradadas na Amazônia: desafios, oportunidades e perspectivas. In: SAMBUICHI, R. H. R. et al. (Orgs.). **Políticas agroambientais e sustentabilidade**: desafios, oportunidades e lições aprendidas. Brasília: IPEA, 2014. p. 149-169.

DINIZ, T. D. A. S.; BASTOS, T. X. Contribuição ao conhecimento do clima típico da Castanha-do-Brasil. **Boletim Técnico**, n. 064, p. 59-71, 1974.

DIONISIO, L. F. S.; CONDÉ, T. M.; GOMES, J. P.; MARTINS, W. B. R.; SILVA, M. W.; SILVA, M. T. Caracterização morfométrica de árvores solitárias de *Bertholletia excelsa* H.B.K. no sudeste de Roraima. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 11, n. 2, p. 163-173, 2017.

DOMINGUES, S. C. O.; SILVA, I. C. O.; SANTOS, J. S.; YAMASHITA, O. M.; CARVALHO, M. A. C. Dinâmica do arco do desmatamento: fronteiras agrícolas. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, n. 8, p.104-110, 2020.

DOMINGUES, A. C. P.; CARVALHO, M. A. C.; FRANÇA, R. N. C. O processo de implementação da integração lavoura-pecuária-floresta na percepção dos produtores rurais do estado de Mato Grosso. **Conjecturas**, v. 21, n. 2, 2021.

DRUMOND, M. A. Espécies Arbóreas Potenciais Para Sistemas Integrados de Produção (ILPF) No Semiárido Brasileiro. In: SANTOS, L. D. T.; MENDES, L. R.; DUARTE, E. R.; GLORIA, J. R.; ANDRADE, J. M. de; CARVALHO, L. R.; SALES, N. de L. P. (Org.). **Integração lavoura-pecuária-floresta: potencialidades e técnicas de produção**. Montes Claros: Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. p. 85-99.

ELEOTÉRIO, J. R.; SILVA, C. M. K. da. Comparação de programas de secagem para Cumaru (*Dipteryx odorata*), Jatobá (*Hymenaea* spp) e Muiracatiara (*Astronium lecointei*) obtidos por diferentes métodos. **Scientia Florestalis**, v. 40, p. 537-545, 2012.

FÁBIO, F. G.; CÂNCIO, I. A. P. Manejo Florestal do Cumaru: um experimento rentável e sustentável em Óbidos, estado do Pará. In: SANTOS, C. A. **Ensaio nas Ciências Agrárias e Ambientais**. Belo Horizonte: Atena Editora, 2019. cap. 5, p. 38-50.

FAJARDO, A. M. P.; TIMOFEICZYK JUNIOR, R. Avaliação financeira do sequestro de carbono na Serra de Baturité, Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 391-399, 2015.

FALESI, I. C.; BAENA, A. R. **Mogno-africano *Khaya ivorensis* A. Chev. em sistema silvipastoril com leguminosa e revestimento natural do solo**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 52 p.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The State of the World's Forests 2020**. Forests, biodiversity and people. Rome, 2020.

FARIA, G. R.; VASCONCELLOS, J. H. **ILPF: olhares para o Brasil sustentável**. Sinop, MT: Embrapa Agrossilvipastoril, 2024.

FERNANDES, T. J. G.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; ALVARENGA, A. de P. Quantificação do carbono estocado na parte aérea e raízes de *Hevea* sp., aos 12 anos de idade, na zona da mata mineira. **Revista Árvore**, v. 31, p. 657-665, 2007.

FERRAZ FILHO, A. C.; RIBEIRO, A.; BOUKA, G. U. D.; FRANK JÚNIOR, M.; TERRA, G. African Mahogany Plantation Highlights in Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 3, e20200081, 2021.

FRANGETTO, F. W.; GAZANI, F. R. **Viabilização jurídica do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil – O protocolo de Kyoto e a cooperação internacional**. Brasília, DF: Instituto Internacional de Educação no Brasil, 2002. 447 p.

FRANK JUNIOR, M. D. A plantação de mogno africano e seus desafios. **Revista Opiniões**, n. 67, p. 62-65, 2022. Disponível em: <https://issuu.com/opinioesbr/docs/opcp67-220331-19h00?fr=sNDMxZjQ3MjA5MzA>. Acesso em: 01 nov. 2023.

FREIRE, F. C. O.; VIEIRA, I. G. P.; GUEDES, M. I. F.; MENDES, F. N. P. **Micotoxinas: importância na alimentação e na saúde humana e animal**. Fortaleza, CE: Embrapa Agroindústria Tropical, 2007. 48 p.

GARCIA, M. G. **Estudo dos constituintes químicos dos resíduos madeireiros de *Andiba parviflora*, *Dipteryx odorata* e *Swartzia laevis* (Fabaceae)**. 2013. 178 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus - AM, 2013.

GATTO, A.; BARROS, N. F. de; NOVAIS, R. F. de; SILVA, I. R. da; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. de A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, p. 895-905, 2011.

GONÇALVES, K. S. T.; SOUSA, H. R. S. S.; MARIANO, D. C.; EBLING, A. A.; OLIVEIRA NETO, C. F.; OKUMURA, R. S. Qualidade de povoamentos de Mogno africano na Amazônia Oriental. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, n. 3, e10030, 2023.

GUMIERO, R. G. Momentos da trajetória do estado na Amazônia: preâmbulo entre o modelo de integração econômica e os investimentos setoriais do fundo constitucional de financiamento do norte e do fundo de desenvolvimento da Amazônia em Carajás, Pará. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 24, e202245, 2022.

HUO, J.; PENG, C. Depletion of natural resources and environmental quality: prospects of energy use, energy imports, and economic growth hindrances, **Resources Policy**. 86 (Part A), 104049, 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. 2020. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=destaques>. Acesso em: 01 nov. 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for national Gas inventories**, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. Acesso em: 01 nov. 2023.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Informações sobre madeiras**, 2011. Disponível em: http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira. Acesso em: 01 nov. 2023.

ITTO – INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. **Review and Assessment of the World Timber Situation**, 2022. Disponível em: <https://www.itto.int/resources/publications>. Acesso em: 01 nov. 2023.

IUCN – INTERNATIONAL UNION FOR THE CONSERVATION OF NATURE. **The IUCN Programme 2013–2016**. Gland, Switzerland: International Union for the Conservation of Nature, 2013.

JÁUREGUI, C. H.; SIST, P.; VINSON, C.; SILVA, R. C. V. M. da; KANASHIRO, M. Impacto da exploração dinâmica de regeneração de duas espécies de uso múltiplo: cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.) e copaíba (*Copaifera reticulata* Ducke). In: CRUZ, H.; SABLAYROLLES, P.; KANASHIRO, M.; AMARAL, M., SIST, P. **Floresta em Pé**. 1. Ed. Belém: IBAMA, 2011. cap. 2, p. 96-120.

KLUTHCOUSKI, J.; PACHECO, A. R.; TEIXEIRA, S. M.; OLIVEIRA, E. T. **Renovação de pastagem de cerrado com arroz**. Sistema Barreirão, Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, Documento 33, 1991. 20 p.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H. Implantação, condução e resultados obtidos com o sistema Santa Fé. In: **Integração lavoura-pecuária**. Ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p. 29-36.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R. (Ed.) **As florestas e o carbono**. Curitiba: FUPEF/Imprensa da UFPR, 2002. p. 251-264.

LEITE, F. F. G. D.; NÓBREGA, G. N.; BAUMGÄRTNER, L. C.; ALECRIM, F. B., SILVEIRA, J. G.; CORDEIRO, R. C.; RODRIGUES, R. A. R. Emissões de gases com efeito de estufa e sequestro de carbono associados aos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). **Revisões Ambientais**. v. 31, n. 4, 2023.

LELES, P. S. S. **Crescimento, alocação de biomassa e distribuição de nutrientes e uso da água em *E. camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos**. 1995. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa - MG, 1995.

LEMMENS, R. H. M. J. *Khaya ivorensis*. In: LOUPPE, D.; OTENG-AMOAKO, A. A.; BRINK, M. (Ed.). **Plant resources of tropical Africa**. Wageningen: PROTA Foundation, 2008.

LOPES, L. C. A.; SANTOS, A. J. M.; BACKES, C.; SILVA, L. L.; MAGALHÃES, A. F. Desenvolvimento florestal em sistema integrado lavoura-pecuária-floresta. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n.11, p. 7-17, 2021.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**. v. 1. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2000. 384 p.

MARTORANO, L. G.; MORAES, J. R. da S. C. de; SILVA, L. K. X.; FERNANDES, P. C. C.; AMARAL JÚNIOR, J. M. do; LISBOA, L. S.; NEVES, K. A. L.; PACHECO, A.; BELDINI, T. P.; APARECIDO, L. E. de O.; SILVA, W. C. da; GODINHO, V. de P. C. Agricultural and livestock production in the Amazon: a reflection on the necessity of adoption of integrated production strategies in the western region of the state of Pará. **AJCS**, v. 15, n. 08, p.1102-1109, 2021.

MARTÍNEZ, G. B.; AZEVEDO, C. M. B. C.; SILVA, A. R.; BOTELHO, F. J. E.; OLIVEIRA, T. K.; GODINHO, V. P. C. Integração lavoura pecuária floresta na região Norte do Brasil. In: BUNGENSTAB, D. J. et al. **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019.

MAUÉS, M. M.; KRUG, C.; WADT, L. H. O.; DRUMOND, P. M.; CAVALCANTE, M. C.; SANTOS, A. C. S. **A castanheira-do-brasil: avanços no conhecimento das práticas amigáveis à polinização**. v. 1. Rio de Janeiro, RJ: Funbio, 2015. 84 p.

MONTEIRO, A.; BARRETO-MENDES, L.; FANCHONE, A.; MORGAVI, D. P.; PEDREIRA, B. C.; MAGALHAES, C. A. S.; ABDALLA, A. L.; EUGÉNE, M. Crop-livestock-forestry systems as a strategy for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing the sustainability of forage-based livestock systems in the Amazon biome. **Science of the Total Environment**. 906, 167396, 2024.

MORAIS, Y. C. B.; ARAÚJO, M. dos S. B. de; MOURA, M. S. B. de; GALVÍNCIO, J. D.; MIRANDA, R de Q. Análise do sequestro de carbono em áreas de caatinga do semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 585-599, 2017.

MORI, S. A.; PRANCE, G. T. Taxonomy, ecology, and economic botany of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.: Lecythidaceae). **Advances in Economic Botany**, v. 8, p. 130-150, 1990.

NASCIMENTO, W. M. O. do; CARVALHO, J. E. U.; MÜLLER, C. H. **Castanha-do-brasil**. Jaboticabal, SP: Funep, 2010. 41 p.

NEVES, A. H. B.; OLIVEIRA, A. C.; ATAIDES, G. C.; SANTOS, C. M. M.; PEREIRA, M. K.; AQUINO, L. F. P.; SCCOTI, M. M. V.; TRONCO, K. M. Q.; MELO, R. R.; MASCARENHAS, A. R. P. Biomassa e carbono em plantio comercial de paricá na Amazônia. **Nativa**, v. 10, n. 2, p. 154-162, 2022.

NHADUCO, O. P. E.; DALLA CORTE, A. P.; BEHLING, A.; SANQUETTA, C. R. Sistema de equações de biomassa de *Pinus* spp. no sul do Paraná. **Scientia Forestalis**, v. 49, n.129, e3457, 2021.

OLIVEIRA, E. B.; RIBASKI, J.; ZANETTI, E. A.; PENTEADO JUNIOR, J. F. Produção, Carbono e Rentabilidade Econômica de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* em Sistemas Silvopastoris no Sul do Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.57, p.45-56, 2008.

ONU – NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 08 out. 2022.

OPUNI-FRIMPONG, E.; KARNOSKY, D. F.; STORER, A. J.; COBBINAH, J. R. Silvicultural systems for plantation mahogany in Africa: Influences of canopy shade on tree growth and pest damage. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 328-333, 2008.

PAIXÃO, F. A.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, M. L. da; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. da. Qualidade do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 30, p. 411-420, 2006.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BRUNETTI, H. B.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; OLIVEIRA, C. C.; MULLER, M. D. Basal area as a strategic indicator for forest component management in silvopastoral systems: insights from long-term experiments. *Agroforestry Systems*, v. 98, n. 7, p. 2013-2025, 2024.

PINHEIRO, A. L.; COUTO, L.; PINHEIRO, D. T.; BRUNETTA, J. M. F. C. **Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilização dos mognos-africanos (*Khaya* spp.)**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura, 2011. 102 p.

PORTELA, J. G. A.; PAULETTO, D. Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre *Dipteryx odorata* no período de 2009 a 2018. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 1, p. 19-28, 2020.

PRACIAK, A.; PASIECZNIK, N.; SHEIL, D.; VAN HEIST, M.; SASSEN, M.; CORREIA, C. S.; DIXON, C.; FYSON, G.; RUSHFORD, K.; TEELING, C. (Ed.). **The CABI encyclopedia of forest trees**. Oxfordshire: CABI, 2013. 523 p.

RANGEL, J. H. A.; MUNIZ, E. N.; AMORIM, J. R. A.; NOGUEIRA JUNIOR, L. R.; SOUZA, S. F.; MORAES, S. A.; AMARAL, A. J.; PIMENTEL, J. C. M.; SÁ, C. O. **Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) Indicados para a Região Nordeste do Brasil**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, Circular Técnica, 160, 2015. 10 p.

REDE ILPF. **Portifólio de projetos**, 2024. Disponível em: <https://redeilpf.org.br/portifolio-de-projetos-da-rede-ilpf/>. Acesso em 02 out. 2024.

REIS, C. A. F., KALIL FILHO, A. N., AGUIAR, A. V., MORAES-RANGEL, A. C. Caracterização das espécies pertencentes ao gênero *Khaya* de interesse no Brasil. In: REIS, C. A. F., OLIVEIRA, E. B., SANTOS, A. M. **Mogno-africano (*Khaya* spp.): atualidades e perspectivas de cultivo no Brasil**. Brasília: Embrapa, 2019. p. 12-49.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. O cultivo do mogno africano (*Khaya* spp.) e o crescimento da atividade no Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e00076814, 2017.

RIBEIRO, J. M.; FREITAS, I. G.; BRITO, B. G. S.; FERNANDES, L. A.; LEITE, L. F. C.; BARBOSA, D. L. A.; SANTOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FRAZÃO, L. A. Agrosilvopastoral system as a potential model for increasing soil carbon stocks: a century model approach. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, e0220136, 2023.

RUSCHEL, R. S.; DEMANBORO, A. C. Serviços Ecossistêmicos Urbanos: Fixação de Carbono nas Áreas de Preservação Permanente de Campinas-SP. **Revista Ambiente & Sociedade**, v. 23, 2020.

SALES, A.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; MIRANDA, B. M. Desempenho do mogno-africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) no sistema ILPF em Terra Alta - PA. In: SIMPÓSIO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS NA AMAZÔNIA. **Anais [...]** Belém, PA: UEPA, 2017.

SALOMÃO, R. P.; SANTANA, A. C.; BRIENZA JUNIOR, S.; ROSA, N. A.; PRECINOTO, R. S. **Crescimento de *Bertholletia excelsa* Bonpl. (castanheira) na Amazônia trinta anos**

após a mineração de bauxita. Belém: Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, 2014. p. 307-320.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; DALLA CORTE, A. P.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SANQUETTA, C.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, M.; PELISSARI, A.; TOMÉ, M. Greenhouse gas emissions due to land use change in Brazil from 1990 to 2015: comparison of methodological approaches. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 53, p. 25-37, 2020.

SANTOS, S. H. M. dos. **Cumaru** *Dipteryx odorata* Willd. **Família Leguminosae**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2002. 4 p.

SANTOS, A. M.; REIS, C. A. F.; AGUIAR, A. V.; KALIL FILHO, A. N.; CIRIELLO, E.; SILVA, J. A.; BORGES, C. T. Aspectos silviculturais. In: REIS, C. A. F., OLIVEIRA, E. B., SANTOS, A. M. **Mogno-africano** (*Khaya* spp.): atualidades e perspectivas de cultivo no Brasil. Brasília: Embrapa, 2019. p. 116-160.

SANTOS, K. L. S.; SENA, W. L.; SILVA, A. L. P.; SALES, T. M.; CORDEIRO, R. A. M.; MEDEIROS, J. G. S.; CANTUÁRIA, P. C.; SILVA, T. R. O uso da Integração Lavoura Pecuária e Floresta – ILPF na Amazônia. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**. v. 17, n. 7, p. 01-17, 2024.

SCHMIDT, N. S.; SILVA, L. C.; HERNÁNDEZ, A. S. Análise do plano de agricultura de baixo carbono (ABC) no Brasil: resultados e perspectivas. **Universidad y Sociedad**, v. 15, n. 6, p. 279-291, 2023.

SCOLES, R.; KLEIN, G. N.; GRIBEL, R. Crescimento e sobrevivência de castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl., Lecythydaceae) plantada em diferentes condições de luminosidade após seis anos de plantio na região do rio Trombetas, Oriximiná, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, v. 9, n. 2, p. 321-336, 2014.

SEFA – SECRETARIA DA FAZENDA. **Boletim informativo de preços mínimos de mercado**, 2009. Disponível em: <http://www.sefa.pa.gov.br>. Acesso em: 01 nov. 2023.

SILVA, T. M. S.; JARDIM, F. C. S.; SILVA, M. P. S. Mercado de amêndoas de *Dipteryx odorata* (cumaru) no estado do Pará. **Floresta**, v. 40, n. 3, p. 603-614, 2010.

SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; SALES, A. Avaliação do mogno-africano (*Khaya ivorensis*) em um latossolo amarelo no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta em Paragominas-PA. In: SIMPÓSIO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS NA AMAZÔNIA. **Anais** [...] Belém, PA: Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, 2014.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C. Influência de renques de mogno africano nos atributos físicos e teor de carbono orgânico de um latossolo amarelo. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 3, p. 291-297, 2016.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M. Desenvolvimento inicial do eucalipto em monocultivo e sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. In: ALFARO, A. T. S.; TROJAN, D. G. (Org.). **Ciências Ambientais e o Desenvolvimento Sustentável na Amazônia**. Curitiba: Atena, 2017. p. 139-146.

SILVA, A. R.; SALES, A. Crescimento e produção de paricá em diferentes idades e sistemas de cultivo. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 1, p. 231-235, 2018.

SILVA, J. G. M.; VIDAURRE, G. B. Propriedades da madeira do mogno-africano (*Khaya* spp.). In: REIS, C.A.F., OLIVEIRA, E.B., SANTOS, A.M. **Mogno-africano (*Khaya* spp.): atualidades e perspectivas de cultivo no Brasil**. Brasília: Embrapa, 2019. p. 287-362.

SILVA, J. W. T.; SOUZA, B. M. L.; SILVA, C. M. Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). **Ciência Animal**, v.30, n.3, p.71-84, 2020.

SILVA, A. C. F.; FREIRE, F. J.; BORGES, C. H. A.; ARAUJO, E. C. A.; SANTANA, G. M.; CUNHA-NETO, E. M.; SANQUETTA, C. R. Teores de carbono em espécies florestais da Caatinga. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 1, p. 71-85, 2022.

SKORUPA, L. A., MANZATTO, C. V. Avaliação da adoção de Sistemas de Integração Lavoura Pecuária-Floresta (ILPF) no Brasil. In: SKORUPA, L. A., MANZATTO, C. V. (Eds.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos**. Embrapa, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1118832/avaliacao-da-adocao-desistemas-de-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-ilpf-no-brasil>. Acesso em: 03 out. 2024.

SOUSA, D. G.; ALMEIDA, S. S.; AMARAL, D. D. Estrutura de uma população manejada da castanheira (*Bertholletia excelsa*) na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi**. v. 2, p. 353-370, 2014.

SPIELAGEN, R. F. Hotspots in the Arctic: Natural archives as an early warning system for global warming. **Geology**, v. 40, n. 11, p. 1055-1056, 2012.

TAVARES, M. G. C. A Amazônia brasileira: formação histórico-territorial e perspectivas para o século XXI. **Espaço e Tempo**, n.9, p. 107-121, 2011.

TER STEEGE, H. et al. Hyperdominance in the Amazonian tree flora. **Science**, v. 342, n. 6156, 1243092, 2013.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. **A castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa*): crescimento, potencialidades e usos**. Boa Vista, RR: Embrapa, 2004. 29 p.

VALDETARO, E. B.; SILVA, F. L. da; RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, L. A. G. Contribuição dos créditos de carbono na viabilidade econômica dos contratos de fomento florestal no sul da Bahia. **Revista Árvore**, v. 35, p. 1307-1317, 2011.

VIEIRA, G.; SANQUETTA, C. R.; KLÜPPEL, M. L. W.; BARBEIRO, L. DA S. S. Teores de Carbono em Espécies Vegetais da Caatinga e do Cerrado. **Revista Acadêmica de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 7, n. 2, p. 145-155, 2009.

VIEIRA, F. S.; ALVES, A. O.; DARDENGO, J. F. E.; ALVES, A. B. C.; ZORTÉA, K. É. M.; BRAGA, L. N.; SILVA, C. J.; LOPES, C. R. A. S.; ROSSI, A. A. B. Population structure and spatial distribution of *Bertholletia excelsa* Bonpl. in Juruena National Park, Southern Amazon. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 8, p. 75-81, 2021.

VIEIRA, D. O.; SOUZA, K. R.; MAGALHÃES, L. A.; VÉRAS, I. V. U. M.; SANTOS, S. C. L. A contaminação da castanha do Brasil por aflatoxinas e seu efeito carcinogênico: uma revisão narrativa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p. 1-11, 2022.

WADT, L. H. O.; MAROCCOLO, J. F. M.; GUEDES, M. C.; SILVA, K. E. **Castanha-da-amazônia**: estudos sobre a espécie e sua cadeia de valor, aspectos sociais, econômicos e organizacionais. Brasília, DF: Embrapa, 2023. 352 p.

WALDHOFF, P.; SOUZA, S.E.X.F.; VIDAL, E. *Bertholletia excelsa*: espécie chave para meios de vida sustentáveis e conservação florestal. **Novos Cadernos NAEA**, v. 25, n. 2, p. 177-196, 2022.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. Carbono orgânico em povoamento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze no sul do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, v. 1, n. 2, p. 63-68, 2003.

WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Teores de carbono em espécies de floresta ombrófila mista. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B. (Ed.). **Fixação de carbono**: atualidades, projetos e pesquisas. Curitiba: UFPR, 2004. p. 95-109.

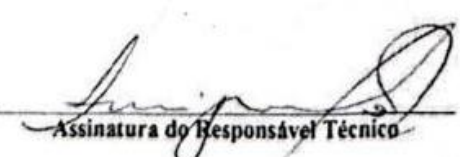
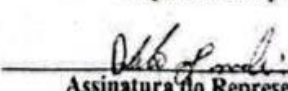
WATZLAWICK, L. F.; MARTINS, P. J.; RODRIGUES, A. L.; EBLING, A. A.; BALBINOT, T. R.; LUSTOSA, S. B. C. Teores de carbono em espécies da floresta ombrófila mista e efeito do grupo ecológico. **Cerne**, v. 20, p. 613-620, 2014.

YU, C. M. **Sequestro florestal de carbono no Brasil**: dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas. São Paulo, SP: Annablume, 2004.

ANEXO

ANEXO A – Autorização de desbaste das árvores do sistema ILPF, localizado na Fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Mojuí dos Campos-PA.

	PREFEITURA DE MOJUI DOS CAMPOS SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE – SEMMA Rua Estrada de Rodagem – S/N Esperança CEP: 68.129-000 – Mojuí dos Campos – Estado do Pará semma@mojuidoscampos.pa.gov.br		Para uso da SEMMA: Secretaria Municipal de Meio Ambiente - SEMMA PROTOCOLO: 027/2020 DATA: 03/03/2020 Diva A. Castro	
	REQUERIMENTO PADRÃO			
1. OBJETIVO DO PEDIDO				
Licença Prévia – LP	()	Renovação	()	Juntada ao Processo nº
Licença de Instalação – LI	()	Solicitação/Doação de Material Apreendido	()	Termos
Licença de Operação – LO	()	Laudo Técnico	()	Declaração
Licença Ambiental Rural – LAR	()	Solicitação de Cadastro de Moto-Serra	()	Outros: (x)
2. PROCESSO				
Número de documentos anexos: 03 (três)		Número de folhas: 06 (seis)		Número de outros (CD, Plotter, etc.):
3. IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDIMENTO/PROPRIEDADE				
Nome ou Razão Social/Nome da Propriedade: BENEDITO MIGUEL MENOLI FAZENDA NOSSA SENHORA APARECIDA			CNPJ/Nº do Documento: 214.231.991-20	
Endereço: Rodovia Santarém/Cuiabá, km 39, s/nº			Inscrição Estadual: 15.220.062-2	
Bairro: Zona Rural		Município: Mojuí dos Campos		UF: PA
Coord. (da sede):	Lat. 2°38'11"	S	Long. 54°56'13"	W
Atividade Licenciada ou a Licenciar:				
Área da Prop. (ha):	Área construída (m²):	Área a construir (m²):	Investimento (R\$):	Investimento (UFIR):
Corpo Receptor:		Bacia:	Sub-bacia:	
Tipo capacitação de água:	Superficial	Subterrânea	Rede Pública	
4. IDENTIFICAÇÃO DO RESPONSÁVEL PELO EMPREENDIMENTO- PROPRIETÁRIO/SÓCIO				
Nome: BENEDITO MIGUEL MENOLI			CPF: 214.231.991-20	
Função/Cargo: Proprietário			RG: 622355	
End.: Rodovia Santarém/Cuiabá, km 39, s/nº.				
Fone/Cel.: 93. 98803-1001 (Mariana Menoli)			E-mail: fazmenoli@hotmail.com	
5. CONTATOS E CORRESPONDÊNCIAS				
Nome ou Razão Social: BENEDITO MIGUEL MENOLI				
End.: Rodovia Santarém/Cuiabá, km 39, s/nº.			Município/UF: Mojuí Dos Campos	

Bairro	CEP:		E-mail: fazmenoli@hotmail.com
Zona Rural			
Fone Residência	Fone Comercial	Fax:	Celular: 93. 98803-1001
6. IDENTIFICAÇÃO DO RESPONSÁVEL TÉCNICO			
Nome ou Razão Social:			
CPF:	Nº do Registro no Órgão de classe:		Nº do Cadastro/SEMMAS:
End.:			
Bairro:	Município/UF:		CEP:
Fone Residência:	Fone Comercial:	Fax:	Celular:
E-mail:		WEB SITE:	
7. IDENTIFICAÇÃO DO REPRESENTANTE LEGAL			
Nome ou Razão Social:			CPF:
End.:			
Bairro:	Município/UF:		CEP:
Fone Residência:	Fone Comercial:	Fax:	
Celular:		E-mail:	
8. DESCRIÇÃO DA(S) ATIVIDADE(S) A SER(EM) LICENCIADA(S)/JUSTIFICATIVA DO REQUERIMENTO			
Segue em anexo ao requerimento as solicitações de supressão de árvores em sistema ILPF.			
9. DECLARAÇÃO			
Declaro para os devidos fins que:			
Venho requerer à Secretaria Municipal de Meio Ambiente (s) respectivo(s) documento(s) relacionado(s) no item I desse requerimento;			
Concordo integralmente com o teor do Estudo/Projeto de Controle Ambiental proposto;			
O desenvolvimento das atividades relacionadas no(s) Estudo(s) Ambiental(ais) realizar-se-ão de acordo com os dados descritos nos mesmos;			
O requerente nesta oportunidade assume a responsabilidade, para efeitos jurídicos, sobre a veracidade das informações prestadas, sob as penas da Lei.			
 Assinatura do Responsável Técnico		Mojuí dos Campos, 15 de janeiro 2020.  Assinatura do Representante Legal Apresentar procuração quando for o caso Reconhecer firma	