

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E
CONSERVAÇÃO DA NATUREZA**

Ricardo Montianele de Castro

**Serviços ecossistêmicos da palmeira nativa “macaúba” (*Acrocomia
aculeata*)**

Juiz de Fora
2023

Ricardo Montianele de Castro

Serviços ecossistêmicos da palmeira nativa “macaúba” (*Acrocomia aculeata*)

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Biodiversidade e Conservação da Natureza. Área de concentração: Comportamento, Ecologia e Sistemática

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Alvim Carvalho

Coorientador: Prof^a Dr^a Dioneia Evangelista Cesar

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Castro, Ricardo Montiane de .

Serviços ecossistêmicos da palmeira nativa "macaúba" (*Acrocomia aculeata*) / Ricardo Montiane de Castro. -- 2023.

174 f. : il.

Orientador: Fabrício Alvim Carvalho

Coorientadora: Dioneia Evangelista Cesar

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza, 2023.

1. *Acrocomia aculeata*. 2. Ecologia. 3. Carbono. 4. Modelagem da distribuição de espécies. 5. Diversidade microbiana do solo. I. Carvalho, Fabrício Alvim, orient. II. Cesar, Dioneia Evangelista, coorient. III. Título.

RICARDO MONTIANE DE CASTRO

Serviços Ecológicos da palmeira nativa "Macaúba" (*Acrocomia aculeata*)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Biodiversidade e Conservação da Natureza. Área de concentração: Comportamento, Ecologia e Sistemática.

Aprovada em 08 de agosto de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabrício Alvim Carvalho - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Dioneia Evangelista César - Coorientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Cristiano Ferrara de Resende
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dra. Carmem Lucas Vieira
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Marcelo Leandro Bueno
Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul

Dr. Gustavo Brant de Carvalho Paterno
Universidade de Göttingen

Juiz de Fora, 04/08/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Carmem Lucas Vieira, Usuário Externo**, em 08/08/2023, às 14:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Brant de Carvalho Paterno, Usuário Externo**, em 08/08/2023, às 14:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabrício Alvim Carvalho, Professor(a)**, em 08/08/2023, às 14:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Ferrara de Resende, Usuário Externo**, em 08/08/2023, às 22:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Leandro Bueno, Usuário Externo**, em 09/08/2023, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Dioneia Evangelista Cesar, Professor(a)**, em 09/08/2023, às 12:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1392977** e o código CRC **50B92A7E**.

À Marina e ao Luca, dedico.

AGRADECIMENTO

Meus agradecimentos ao Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza da Universidade Federal de Juiz de Fora por aceitar minha proposta de trabalho e dar todo o suporte possível para a execução desse projeto.

Ao meu orientador Fabrício, por ter apostado no projeto, por toda orientação tanto no aspecto acadêmico quanto humano, minha gratidão.

À minha co-orientadora Dioneia por ter aberto um novo mundo para mim: o dos procariotos de vida livre.

Ao professor Marcelo Bueno por ter também me apoiado em todos os passos para compreender melhor as técnicas da modelagem da distribuição de espécies.

À minha esposa Marina e ao meu filho Luca por todo suporte e por suportarem as adversidades nesse período de aperfeiçoamento pessoal, especialmente durante e após a pandemia. Vocês são incríveis.

Aos colegas de laboratório especialmente aos que puderam me auxiliar nas atividades de campo, (Marcelly, Monique, Thales, Lisandra).

Ao meu sogro Samuel por ter desenvolvido dispositivos eletrônicos que apesar de não terem sido usados a tempo nessa tese, por motivos de força maior, ainda o serão em futuros estudos.

Agradecimento especial à colega de laboratório Débora por me auxiliar nos trabalhos de campo e no laboratório de ecologia microbiana.

Ao Maxi pela amizade desenvolvida durante sua estadia por aqui além da ajuda nos trabalhos de campo.

Ao Jurandir e ao Leôni pela ajuda nos trabalhos de campo.

À Universidade Federal de Juiz de Fora pela bolsa de estudos.

À CAPES pela bolsa de estudos.

Ao FUNBIO pelo auxílio financeiro sob o Contrato de Concessão de Bolsa Funbio nº 036/2021 para execução dessa tese.

Ao Jules por permitir a realização dos estudos na Fazenda Cachoeirinha.

Agradecimento especial ao povo brasileiro.

RESUMO

A macaúba – *Acrocomia aculeata* (Arecaceae) vem sendo estudada como uma solução baseada na natureza para mitigar os efeitos das mudanças no clima. Essa tese teve como objetivo geral contribuir com a avaliação de serviços ecossistêmicos fornecidos pela macaúba. Para tanto, no capítulo 1 desenvolveu-se uma revisão bibliográfica sobre os aspectos biológicos da espécie. Foram observados aspectos da genética de populações voltado ao melhoramento vegetal; interações com outros organismos; funcionamento biológico da espécie considerando as diferentes partes da planta; sua interação com a espécie humana ao longo do tempo e atualmente; e serviços ecossistêmicos abordados até então. Foi apresentado, no capítulo 2 o inventário florestal com foco em carbono, de um plantio comercial de macaúba em Olaria, MG. Foram instaladas 33 parcelas de 400 m² aleatoriamente. Mediu-se circunferência a altura do peito e altura total dentre outros atributos. Utilizou-se equação alométrica adequada para espécie para estimar o carbono. Foi observada variabilidade dos atributos dendrométricos da população amostrada. O estoque de carbono registrado no plantio comercial de 24 hectares apresentou 1.778,34 toneladas de CO₂eq. considerando um erro amostral de 23,96%. No capítulo 3, foi realizada modelagem da distribuição de macaúba para o presente e para o futuro. Foram utilizadas variáveis bioclimáticas além de variáveis ambientais como vegetação, classificação de solos, pH do solo e matéria orgânica do solo. Utilizaram-se múltiplos algoritmos em conjunto. Utilizaram-se diferentes modelos de circulação global para o futuro. O modelo corroborou estudo anterior quanto à adequabilidade atual da macaúba. Observou-se a expansão da espécie em diferentes cenários de emissões de gases do efeito estufa com retrações pouco expressivas em sua área adequada atual. No capítulo 4, foi realizada a avaliação da comunidade microbiana do solo utilizando marcadores moleculares através de hibridização fluorescente in situ de táxons previamente selecionados. Foram investigados solos em pastagem consorciada com macaúba e pastagem não consorciada. Também foi avaliada a posição no relevo em cada um dos tipos de cobertura vegetal incluindo topo de morro, encosta e baixada. O levantamento da microbiota de

solos de pastagem consorciada com macaúba quando comparado ao de pastagens não consorciadas apresentou diferença significativa da densidade de microrganismos, com acréscimo dos mesmos em pastagens consorciadas. Observou-se que o relevo importa na densidade de microrganismos e na diversidade dos mesmos. Baixadas de pastagem consorciadas apresentaram maior índice de diversidade em detrimento de pastagens não consorciadas em encosta. Associa-se essa diferença à presença da macaúba no sistema e à influência do escoamento superficial. Tais resultados vêm agregar mais valor à macaúba enquanto promissora novidade agrônômica de origem nativa, apta a incrementar o produto interno bruto brasileiro em concordância com a resiliência e a mitigação às mudanças no clima em curso.

Palavras-chave: *Acrocomia aculeata*. Ecologia. Carbono. Modelagem da distribuição de espécies. Diversidade microbiana do solo.

ABSTRACT

Macaúba - *Acrocomia aculeata* (Arecaceae) has been extensively studied as a nature-based solution to mitigate the effects of climate change. The primary objective of this thesis was to contribute to the evaluation of the ecosystem services provided by the macaúba palm. Chapter 1 comprised a literature review focusing on various biological aspects of the species, including population genetics and plant breeding, interactions with other organisms, biological functioning of different parts of the plant, historical and current interactions with humans, and ecosystem services explored thus far. Chapter 2 presented a forest inventory, with a specific emphasis on carbon assessment, conducted in a commercial macaúba plantation in Olaria, MG. Thirty-three 400 m² plots were randomly established, and measurements were taken, including circumference at breast height and total height, among other attributes. An allometric equation tailored for this species was utilized to estimate carbon. Variability in dendrometric attributes within the sampled population was observed. The recorded carbon stock in the 24-hectare commercial plantation was 1,778.34 tons of CO₂eq., with a sampling error of 23.96%. Chapter 3 involved modeling the distribution of macaúba for both the present and the future. Bioclimatic variables, along with environmental factors such as vegetation, soil classification, soil pH, and organic matter content, were incorporated. Multiple algorithms were applied, and different global circulation models were employed to project future scenarios. The model findings confirmed previous studies regarding the current suitability of macaúba habitats. Significant expansion of the species was noted in various greenhouse gas emission scenarios, with minimal retractions in its current suitable areas. Chapter 4 focused on evaluating the soil microbiological community using molecular markers and fluorescence in situ hybridization of selected taxa. Soils in pastures intercropped with macaúba were compared with those in non-intercropped pastures, considering the topography, including hilltops, slopes, and lowlands. Microorganism density significantly differed between intercropped and non-intercropped pastures, indicating an increase in microorganism density in intercropped pastures. The relief was found to influence microorganism density and diversity, with lowlands in

intercropped pastures showing higher diversity indices, likely due to the presence of macaúba and the influence of surface runoff. These results underscore the value of macaúba as a promising agronomic innovation of native origin, capable of enhancing Brazil's gross domestic product while contributing to ongoing efforts in climate change resilience and mitigation.

Keywords: *Acrocomia aculeata*. Ecology. Carbon. Species distribution modeling. Soil microbial diversity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Roteiro para seleção de artigos incluídos nessa revisão utilizando métodos automáticos e manuais	28
Figura 2 - Organismos e suas relações com macaúba incluindo tipo de relação ecológica e partes da planta onde ocorrem tais relações	44
Figura 3 - Limites do Brasil, sua respectiva divisão em biomas e estados e pontos de ocorrência da macaúba no Brasil.	93
Figura 4 - Aspecto da macaúba em plantio comercial.	94
Figura 5 - Mapa de adequabilidade atual para <i>Acrocomia aculeata</i> considerando diferentes faixas de adequabilidade. Os biomas brasileiros e o limite dos estados são apresentados.	100
Figura 6 - Percentual de áreas com adequabilidade ambiental por bioma brasileiro para a espécie <i>Acrocomia aculeata</i>	101
Figura 7 - Previsão do comportamento de <i>Acrocomia aculeata</i> nos diferentes cenários de emissão de gases do efeito estufa (SSP - <i>Shared Socio-economic Pathways</i> 245 e 585) - para os períodos de 2041 a 2060 e 2081 a 2100.	105
Figura 8 - Mapa de localização da Fazenda Serra Negra e das unidades amostrais desse estudo	123
Figura 9 - Distribuição de unidades amostrais em pastagem não consorciada ilustrando a distribuição das unidades amostrais de maneira estratificada no relevo.	124
Figura 10 - Densidade média de microorganismos (arquea, bactérias) nos diferentes tipos de vegetação (pastagens consorciada - macaúba; pastagens não consorciadas - pastagem)	129
Figura 11 - Quantitativo global de microrganismos (arquea, bactérias) separados por tipo de vegetação (pastagens consorciadas com macaúba e não consorciadas) e tipos de relevo (topo de morro, encosta e baixada) (tipos de relevo com * apresentaram diferença estatística significativa quando comparados dois a dois entre os tipos de vegetação - Kruskal-Walis. $P < 0.004494$).	130

Figura 12 - Percentual de microrganismos captados pelas sondas nos diferentes tipos de vegetação (pastagens consorciadas com macaúba - “Macaúba” e pastagens não consorciadas - “Pastagens”). 132

Figura 13 - Percentual de táxons captados em relação ao computo total de microrganismos nos diferentes tipos de vegetação (pastagens consorciadas com macaúba - “Macaúba” e pastagens não consorciadas - “Pastagem”) e relevo (baixada, encosta e topo de morro).133

Figura 14 - Densidade de microrganismos (10^8 cel/g) captados pelas sondas nos diferentes tipos de vegetação (pastagens consorciadas com macaúba - “Macaúba” e pastagens não consorciadas - “Pastagens”) e relevo (baixada, encosta e topo de morro). 134

Figura 15 - Gráfico da PCA considerando densidade global de microrganismos, densidade de taxon selecionados, número de indivíduos de palmeiras e carbono por hectare de palmeiras (onde: macaúba_b: pastagem consorciada com macaúba em baixada; macaúba_e: pastagem consorciada com macaúba em encosta; macaúba_t: pastagem consorciada com macaúba em topo de morro; pastagem_b: pastagem não consorciada em baixada; pastagem_e: pastagem não consorciada em encosta; pastagem_t: pastagem não consorciada em topo de morro) .136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação dos trabalhos com genética de populações de <i>Acrocomia aculeata</i> abordadas no estudo	30
Tabela 2 - Número de indivíduos (N), DAP médio (cm), altura total média (m) e carbono (kg) por parcela	79
Tabela 3 - Estatística do inventário florestal das áreas de macaúba estabelecidas na fazenda Serra Negra	80
Tabela 4 - Comparação do carbono equivalente por hectare por ano, densidade de plantação e carbono equivalente por planta por ano entre espécies utilizadas em sistemas agroflorestais (* plantio com 4,7 anos; ** plantio com 9 anos).....	81
Tabela 5 - Performance dos modelos para <i>Acrocomia aculeata</i> obtidos a partir dos algoritmos selecionados onde AUC é área sob a curva de resposta TSS é estatística verdadeira de habilidade.....	99
Tabela 6 - Áreas com diferentes adequabilidades de <i>Acrocomia aculeata</i> por estado brasileiro.....	102
Tabela 7 - Valores das áreas de retração, inadequadas, estáveis e de expansão para <i>Acrocomia aculeata</i> nos diferentes cenários de emissão de gases do efeito estufa para os períodos de 2041 a 2060 e 2081 a 2100	104
Tabela 8 - Área de pastagem na zona adequada atual para <i>Acrocomia aculeata</i> , valor de sequestro de carbono por hectare ano, contribuição ao sequestro de carbono global em gigatoneladas e percentual sequestrado em relação às emissões globais de 2019, onde ha = hectares; ton = tonelada; co ₂ eq= gas carbônico equivalente definido no capítulo 2; Gton = gigatonelada.	106
Tabela 9 - Relação das sondas FISH utilizadas na avaliação da microbiota do solo em pastagens consorciadas com macaúba e pastagens não consorciadas.....	125
Tabela 10 - Valor de teste Mann-Whitney comparando-se o quantitativo global de microrganismos entre diferentes tipos de vegetação e de	

relevo onde: M(B) = Pastagens consorciadas com macaúba em baixada; M(E) = Pastagens consorciadas com macaúba em encosta; M(M) = Pastagens consorciadas com macaúba em topo de morro; P(B) = Pastagens não consorciadas em baixada; P(E) = Pastagens não consorciadas em encosta; P(M) = Pastagens não consorciadas em topo de morro. Valores em *itálico* representam diferenças estatísticas significativas. 131

Tabela 11 - Índices de diversidade de Shannon (nats por indivíduos) e equabilidade de Pielou nos diferentes tipos de vegetação (pastagens consorciadas com macaúba - macaúba e pastagens não consorciadas - pastagens) e relevo (baixada, encosta e topo de morro), onde H' = índice de diversidade de Shannon; J = índice de equabilidade de Pielou. 135

Tabela 12 - Parâmetros para análise de componentes principais 137

Tabela 13 - Base de dados para avaliação de carbono em plantio comercial de macaúba. Onde: CAP = circunferência à altura do peito (em centímetros); DAP = diâmetro à altura do peito (em centímetros); Hc = altura comercial (em metros); Ht = altura total (em metros).. 154

Tabela 14 - Base de dados da avaliação da microbiota do solo em pastagens consorciadas e pastagens não consorciadas 167

Tabela 15 - Localização das unidades amostrais separadas por tipo de cobertura vegetal e relevo (coordenadas UTM - SIRGAS 2000)... 172

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 CAPÍTULO 1 - ASPECTOS BIOLÓGICOS DA MACAÚBA (<i>ACROCOMIA ACULEATA</i> - ARECACEAE): UMA REVISÃO	21
2.1 RESUMO	21
2.2 ABSTRACT	23
2.3 INTRODUÇÃO	25
2.4 MATERIAL E MÉTODOS	27
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
2.5.1 Populações	29
2.5.2 Performance Biológica da Macaúba	34
2.5.2.1 Tipos de Solo e Clima	34
2.5.2.2 Fotossíntese	35
2.5.2.3 Floração e Frutificação	37
2.5.2.4 Raízes	39
2.5.2.5 Sementes e Germinação	40
2.5.3 Ecossistema Macaúba	43
2.5.3.1 Vegetais	44
2.5.3.2 Microorganismos	45
2.5.3.3 Animais	46
2.5.3.3.1 Artrópodes	46
2.5.3.3.2 Vertebrados	48
2.5.4 Macaúba Antrópica	50
2.5.5 Serviços Ecossistêmicos	52
2.5.5.1 Adequabilidade (modelagem de nicho) e modelos climáticos	52
2.5.5.2 Captação e escoamento de água pelo solo	55
2.5.5.3 Qualidade da pastagem e atributos químicos do solo (incluindo carbono) em pastagens consorciadas com macaúba	56
2.5.5.4 Emissões e sequestro de gases do efeito estufa	57
2.6 CONCLUSÕES	58
2.7 REFERÊNCIAS	60

3 CAPÍTULO 2 - ESTOQUE DE CARBONO DE UM PLANTIO COMERCIAL DE MACAÚBA (<i>ACROCOMIA ACULEATA</i>) EM MINAS GERAIS, BRASIL ..	72
3.1 RESUMO	72
3.2 ABSTRACT	74
3.3 INTRODUÇÃO	75
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	76
3.4.1 Área de estudos e amostragem	76
3.4.2 Equação alométrica, cálculo de carbono equivalente e estatística utilizada	77
3.5 RESULTADOS	78
3.6 DISCUSSÃO	80
3.7 CONCLUSÕES	82
3.8 REFERÊNCIAS	82
4 CAPÍTULO 3 - <i>ACROCOMIA ACULEATA</i> (MACAÚBA): MODELANDO, PREVENDO E PROJETANDO UM NOVO E LUCRATIVO SUMIDOURO GLOBAL DE CARBONO.....	86
4.1 RESUMO	86
4.2 ABSTRACT	88
4.3 INTRODUÇÃO	90
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	92
4.4.1 Área de estudo	92
4.4.2 Espécie alvo	93
4.4.3 Variáveis Climáticas e Ambientais	94
4.4.4 Modelagem da Distribuição de Espécies	95
4.4.4.1 <i>Dados de ocorrência</i>	96
4.4.4.2 <i>Variáveis preditoras</i>	96
4.4.4.3 <i>Modelo de distribuição</i>	97
4.4.4.4 <i>Potencial de sequestro de carbono nas áreas adequadas</i>	98
4.5 RESULTADOS	98
4.6 Performance dos modelos	99
4.7 Áreas de adequabilidade nos biomas e estados brasileiros	99
4.8 Comportamento da Macaúba para os cenários futuros	103
4.9 Potencial de sequestro de carbono nas áreas adequadas	106

4.10 DISCUSSÃO	106
4.11 CONCLUSÕES	109
4.12 REFERÊNCIAS	111
5 CAPÍTULO 4 - DIVERSIDADE MICROBIANA DO SOLO DE PASTAGEM	
TROPICAL DECLIVOSA CONSORCIADA COM MACAÚBA (<i>ACROCOMIA</i>	
<i>ACULEATA</i>).....	
5.1 RESUMO	116
5.2 ABSTRACT	118
5.3 INTRODUÇÃO	120
5.4 MATERIAL E MÉTODOS	122
5.4.1 Área de estudos	122
5.4.2 Coleta de amostras de solo	123
5.4.3 Seleção de sondas FISH	124
5.4.4 Procedimentos laboratoriais	126
5.4.4.1 <i>Preparação da amostra</i>	126
5.4.4.2 <i>Contagem de microorganismos</i>	127
5.4.5 Estatística	128
5.5 RESULTADOS	128
5.5.1 Densidade total de procariotos e fungos	129
5.5.2 Densidade de arquea bactérias e fungos	131
5.5.3 Índices de diversidade	134
5.5.4 Correlação da estrutura da comunidade microbiana com parâmetros da cobertura de palmeiras	135
5.6 DISCUSSÃO	138
5.7 CONCLUSÃO	143
5.8 REFERÊNCIAS	143
6 CONCLUSÃO	148
7 REFERÊNCIAS	149
APÊNDICE A - BANCO DE DADOS DA AMOSTRAGEM DE MACAÚBAS	
PARA QUANTIFICAÇÃO DE CARBONO.....	
APÊNDICE B - BANCO DE DADOS DA AMOSTRAGEM DA MICROBIOTA	
DO SOLO	167

APÊNDICE C - COORDENADAS DAS UNIDADES AMOSTRAIS PARA AVALIAÇÃO DA MICROBIOTA DO SOLO	172
---	-----

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos acadêmicos concorda que "o aquecimento do sistema climático é inequívoco" e "é extremamente provável que a influência humana tenha sido a causa dominante do aquecimento observado desde meados do século XX" (COSTA & CUKIERMAN, 2019). Mudanças no clima podem ocorrer naturalmente, mas a velocidade das mudanças no clima da atualidade é sem precedentes (MOORE & SCHINDLER, 2022). As concentrações de gás carbônico e metano na atmosfera do ano de 2020 cresceram 149% e 262% quando comparados com níveis pré-industriais (ZHANG et al., 2022).

As principais causas das alterações antropogênicas no clima estão associadas às emissões de gases do efeito estufa pela queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso do solo incluindo urbanização e conversão de florestas em áreas agricultáveis (KALNAI & CAI, 2003). Em nível global, se destacam as emissões de gases do efeito estufa a partir da queima de combustíveis fósseis para geração de energia, mas em níveis locais e regionais, urbanização e conversão de vegetações naturais em outros tipos de cobertura do solo incluindo agricultura também são importantes (KARL & TRENBERTH, 2003). De acordo com RITCHIE et al. (2020), mudanças no uso do solo correspondem a 9% das emissões de gases do efeito estufa ao nível global, ao passo que no Brasil 67% das emissões advêm de mudanças no uso do solo. Esse alto percentual de emissões por mudanças no uso do solo está diretamente relacionado à conversão de florestas, especialmente nos biomas Amazônia e Cerrado, em áreas para criação extensiva de gado e produção agrícola em larga escala, com destaque para a soja (MORTON et al., 2006; BARONA et al., 2010).

Céticos ocasionais financiados por empresas do agronegócio no Brasil desafiam a origem antropogênica do aquecimento global na mídia apesar de não publicarem essas proposições em artigos científicos revisados por pares. (COSTA & CUKIERMAN, 2019). Parte desse negacionismo advêm de

campanhas publicitárias de empresas do setor de petróleo e gás que apesar de financiarem estudos científicos revisados por pares e gerarem documentos internos que atribuem origem antropogênica ao aquecimento global, vêm propositadamente publicando anúncios negacionistas em forma de editoriais em jornais de grande circulação internacional (SUPRAN & ORESKES, 2020). Incertezas científicas eventualmente podem ser utilizadas como justificativas para inação climática ao nível de políticas públicas (PIELKE JR, 2004), assim como o catastrofismo, no qual se diga que não há mais tempo para mitigação ou adaptação às mudanças no clima também podem ser considerados um tipo de negacionismo climático (MCMANUS, 2023).

Tais mudanças na atmosfera podem afetar profundamente a biosfera da qual a humanidade depende (MALHI et al., 2020). Espécies e seus respectivos habitats podem ser afetados por mudanças no clima através de alterações na estrutura e no funcionamento do ecossistema, gerando perturbações nas cadeias alimentares (QURATULANN et al., 2021). Muitas evidências apontam que as alterações climáticas, especialmente o aumento dos eventos extremos, vêm afetando mudanças de produtividade, interações entre espécies e invasões biológicas (YANG et al., 2021). Portanto, além de alterações no meio físico do planeta, é esperado que a biota global se altere pela modificação da adequabilidade de seus nichos ecológicos, culminando em extinções de espécies sensíveis (CHAUDHRY et e SIDHU, 2022; MANES et al., 2021).

A mitigação das mudanças climáticas se destaca como um desafio preeminente das políticas públicas no século XXI (MERGENTHALER, 2015). Esse contexto exige a implementação de diversas medidas, muitas das quais estão intrinsecamente ligadas aos processos energéticos (ROSEN, 2020). A mitigação concentra-se em intervenções destinadas a reduzir as concentrações de gases de efeito estufa. Estas intervenções abrangem desde a implementação de medidas que diminuam as emissões de gases de efeito estufa até a remoção do carbono da atmosfera, incluindo tecnologias de emissões negativas com o objetivo de capturar e armazenar carbono atmosférico, reduzindo assim os níveis de dióxido de carbono na atmosfera (FAWZY et al., 2020). A mitigação das mudanças climáticas exige uma

abordagem multifacetada e interdisciplinar, que vai desde a transformação dos processos energéticos até a redefinição de nossos padrões de consumo, em prol de um futuro sustentável para nosso planeta.

Uma das metas acordadas nos diversos encontros das partes nas conferências mundiais sobre o clima (COPs - Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima) é a redução da emissão de gases do efeito estufa em um prazo adequado para, pelo menos, minimizar os efeitos das mudanças no clima já em curso (KINLEY et al., 2021). Para tanto, é necessário desenvolvimento tecnológico que possibilite a alteração da matriz energética baseada em combustíveis fósseis, por uma matriz energética diversificada que não contribua para acréscimo de gases do efeito estufa na atmosfera (KEMFERT, 2019). Uma das saídas é a busca por soluções baseadas na natureza, especialmente no que se refere à remoção de gases do efeito estufa através da fotossíntese, associada à substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis (GIRARDIN et al., 2021; SALEH et al., 2022). Nesse sentido, essa tese apresentará como a macaúba pode contribuir tanto na remoção de gases do efeito estufa quanto na produção de biocombustíveis em larga escala.

No âmbito da transição para uma matriz energética ambientalmente sustentável, é importante considerar o papel desempenhado pelos serviços ecossistêmicos. Estes não só constituem elementos vitais para a sobrevivência dos sistemas de suporte à vida na Terra, mas também representam aliados estratégicos na mitigação das emissões de gases do efeito estufa (LOCATELLI, 2016).

Uma das primeiras definições de serviços ecossistêmicos foi apresentada por CONSTANZA et al. (1997), em que postula-se que os serviços dos sistemas ecológicos e os estoques de capital natural produzidos por tais serviços são críticos para o funcionamento do sistema de suporte de vida do planeta Terra. Eles contribuem para o bem-estar humano de forma direta e indireta, representando parte do valor econômico do planeta. Os autores, assim como o MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005), sugerem que os serviços ecossistêmicos não são completamente computados em mercados comerciais e que, em função disso, pouco peso é dado em decisões políticas relacionadas ao tema. CONSTANZA et al. (1997)

afirma que dar o devido peso ao estoque de capital natural provido pelos serviços ecossistêmicos é importante para a manutenção do bem-estar humano ao longo do tempo.

De acordo com o MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005), “serviços ecossistêmicos são os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas. Estes incluem serviços de provisionamento, regulação e culturais que afetam diretamente as pessoas e serviços de apoio necessários para manter os outros serviços”. O mesmo instituto, a partir de critérios funcionais, subdivide tais serviços em quatro categorias: 1) serviços de suporte; 2) serviços de provisão; 3) serviços de regulação e 4) serviços culturais. Os serviços de suporte são aqueles necessários à produção de todos os outros serviços ecossistêmicos. Eles diferem das demais categorias de serviços devido a seus impactos nas pessoas se darem de forma indireta ou por ocorrerem durante longos períodos. Dentre os serviços de suporte podem ser mencionados a formação de solo, a ciclagem de nutrientes e a produção primária. Os serviços de provisão referem-se a produtos obtidos a partir de ecossistemas como: comida, água doce, biocombustíveis (incluindo lenha), fibras, bioquímicos e recursos genéticos. Os serviços de regulação são os benefícios obtidos da regulação a partir de processos ecológicos como: regulação do clima, regulação de doenças, regulação da água, purificação da água e polinização. Os serviços culturais são benefícios impalpáveis obtidos a partir de ecossistemas incluindo: espirituais e religiosos, recreação e ecoturismo, estéticos, inspirativos, educativos e herança cultural.

CONSTANZA (2020) aponta as relações complexas que levam ao objetivo do bem-estar sustentável de todo o sistema, incluindo o da humanidade, conectado ao restante da natureza. O mesmo autor aponta que essa conectividade deve passar por uma abordagem de valoração que considere alocação eficiente, distribuição justa e escala sustentável, as quais consideram respectivamente preferências individuais, comunitárias e aquelas de todo o sistema natural. O autor aponta a importância da interação entre os capitais humano, social e manufaturado, os quais, sobrepostos, de alguma forma interagem entre si e que, por sua vez, são suportados pelo capital natural, em que, através de interações a partir de serviços ecossistêmicos, podem prover o bem-estar humano sustentável.

Para tanto, uma questão de potencial importância é a valoração financeira de serviços ecossistêmicos e da biodiversidade. Valorar financeiramente tais ativos baseia-se na premissa de que tal valoração pode auxiliar elaboradores de políticas públicas a tomarem melhores decisões (NINAN & INOUE, 2013). Nesse sentido, os mesmos autores apontam a importância de florestas como sumidouros de carbono, onde reflorestamentos e redução de desmatamentos por mecanismos do desenvolvimento limpo podem ser considerados boas estratégias para combater o aquecimento global.

Considerando soluções baseadas na natureza para mitigação e adaptação às mudanças no clima, é fundamental buscar recursos da biodiversidade que atendam a tais demandas. Apesar de o Brasil ser o campeão mundial da biodiversidade e a biodiversidade ser fonte das principais matérias-primas utilizadas pela humanidade, poucas são as espécies vegetais brasileiras domesticadas ou mesmo utilizadas em larga escala através de extrativismo (GROOMBRIDGE et al., 2002). Por outro lado, uma plêiade de plantas nativas vem sendo utilizadas por povos originários ao longo do tempo (CASSINO et al., 2021), das quais mais de 600 espécies têm sido destacadas com potencial aproveitamento econômico (VIEIRA et al., 2018; LEMOS et al., 2018; CORADIN et SIMINSKI, 2011). Portanto, o baixo aproveitamento que grande parte das espécies úteis da flora brasileira vem sofrendo, onde apenas três espécies de cereais (arroz, milho e trigo) compõem cerca de metade da ingestão de calorias ao nível global, pode estar ocultando importantes soluções tecnológicas para as demandas humanas a partir de diversas matérias-primas (HUNTER et al., 2019).

Portanto, a busca por espécies vegetais que produzam energia com altas produtividades torna-se um caminho interessante a ser explorado. Dentre a miríade de espécies vegetais brasileiras, encontrou-se na palmeira macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart. - Arecaceae) uma provável alternativa que atenda às demandas da produção energética. Além disso, é louvável que se pratique uma agricultura em estratos verticais de modo a otimizar o uso do solo (ODUNIYI & TEKANA, 2019). A macaúba atende essa premissa e assim supera o dilema de produzir bioenergia de

origem agrícola ou alimentos através da produção agrícola em sistemas agroflorestais.

Lançada pelo Governo de Minas Gerais no Dia Internacional do Meio Ambiente de 2014, a Plataforma Mineira de Bioquerosene e Renováveis vem promovendo o desenvolvimento de projetos regionais no Estado de Minas Gerais para produção de biocombustíveis sustentáveis a partir de óleos vegetais e resíduos orgânicos. Pautado nas metas do iNDC (Contribuições Intencionadas Nacionalmente Determinadas pelas partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima) do Brasil no Acordo de Paris, a Plataforma tem buscado modelos replicáveis de mudanças de paradigma na forma de soluções integradas para questões ambientais, desenvolvimento social e saneamento básico, para a mitigação das emissões de gases do efeito estufa através da substituição do uso de combustíveis fósseis pelos renováveis alinhados com as políticas públicas e com a biodiversidade regional dos biomas brasileiros.

Diante da importância da macaúba (*Acrocomia aculeata*) como alternativa de alto interesse para diversificação dos insumos da matriz de produção do biocombustíveis, esta oleaginosa vem sendo domesticada nos últimos 10 anos pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e EPAMIG com patrocínio da Petrobrás. Os resultados desse trabalho alcançaram um estágio de desenvolvimento que permite sua introdução em projetos de restauro ambiental e plantios comerciais para produção de biomassa sustentável voltada ao segmento de biocombustíveis.

Em face deste desenvolvimento, e devido às enormes ocorrências naturais desta palmeira, a Plataforma Mineira de Bioquerosene e Renováveis escolheu a Macaúba como principal alternativa de óleo vegetal/biomassa para produção de biocombustíveis. A Plataforma visa estabelecer um novo ciclo virtuoso na economia regional com a injeção de recursos para o reflorestamento de 130.000 hectares até 2050, integrando a Agricultura Familiar e o Agronegócio no segmento dos biocombustíveis e produtos renováveis.

As ações da Plataforma Mineira de Bioquerosene e Renováveis para estruturação de cadeias regionais altamente integradas estão alinhadas com políticas públicas como o RENOVBIO (que prevê a emissão de Certificados

de Descarbonização – CBIO, pelos produtores de biocombustíveis baseado no ciclo de vida da biomassa utilizada) e PLANAVEG (que visa a recuperação da vegetação nativa), incentivando a recuperação de áreas de preservação permanente (APPs), reservas legais (RLs) e pastagens degradadas com espécies oleaginosas nativas dos Biomas brasileiros incluindo a macaúba. O objetivo é promover o desenvolvimento regional sustentável e a descarbonização da economia preconizada pelo Acordo de Paris. Para tanto, são propostos três modelos adequados a cada um dos tipos de uso do solo acima mencionados. Para pastagens degradadas, propõe-se plantio totalizando 400 indivíduos de macaúba por hectare em consórcio com sistema silvopastoril (bovinocultura ou caprinocultura) ou com culturas anuais, forrageiras ou silagem. Para RLs, é proposto o plantio ao longo da Reserva Florestal Legal, em linhas totalizando 50% do total da área com 200 indivíduos por hectare. Para APPs, propõe-se plantio nas bordas externas dessas áreas em uma a três linhas de 5 x 5 m, totalizando 10% do total da APP com 40 indivíduos por hectare.

Frente ao exposto, o objetivo dessa tese foi contribuir com avanços no conhecimento sobre serviços ecossistêmicos prestados pela macaúba. Para tanto, os principais aspectos da biologia da macaúba serão explorados no capítulo 1, onde destaca-se a alta produtividade de óleos vegetais que a macaúba pode fornecer. Também será abordada sua grande capacidade de sequestro de carbono no capítulo 2. Nesse contexto, é importante compreender como o cultivo dessa espécie poderá responder aos eventos de mudanças no clima, e para tanto, será abordado no capítulo 3 dessa tese a modelagem da distribuição dessa espécie frente às mudanças no clima. O conhecimento sobre nicho ecológico é essencial para entender interações ecológicas, evolução e distribuição de espécies (PEDRUSKI, 2015). Modelos de nicho são cruciais na pesquisa biogeográfica, especialmente diante das mudanças climáticas, considerando modificações de habitat (MILLER & HOLLOWAY, 2017; WARREN, 2012). Sendo assim, é possível orientar tomada de decisões quanto ao estabelecimento dessa cultura vegetal em escala nacional, além de calcular serviços ecossistêmicos referentes à descarbonização da economia.

Além desses aspectos, é importante considerar o papel de microorganismos para uma agricultura sustentável, os quais promovem crescimento e resistência de plantas, remediação de solos contaminados e reciclagem de nutrientes (RASHID et al., 2019; GUPTA et al., 2022). Sendo assim, é válido compreender melhor como o consorciamento de macaúba com pastagens, como o aqui apresentado, pode contribuir com a melhoria de solos e pastagens através da análise do componente microbiológico do solo enquanto indicador de qualidade ambiental para vegetação. Tal aspecto será abordado aqui no capítulo 4.

2 CAPÍTULO 1 - ASPECTOS BIOLÓGICOS DA MACAÚBA (*ACROCOMIA ACULEATA* - ARECACEAE): UMA REVISÃO

2.1 RESUMO

Diante da necessidade de descarbonizar a economia em resposta às mudanças climáticas, a busca por fontes orgânicas de energia tem se intensificado. Nesse contexto, a macaúba (*Acrocomia aculeata*), uma palmeira nativa das Américas, emerge como uma solução promissora devido à sua notável produtividade de óleo. Foram realizadas buscas nas bases de dados Web of Science, Scopus e PubMed, utilizando os termos "macaúba" e "*Acrocomia aculeata*". Após a análise e seleção, 91 estudos foram considerados para uma revisão da biologia da macaúba, proporcionando uma visão abrangente, ainda que não exaustiva, dos seus aspectos biológicos. Dentre os estudos analisados, 21 focaram-se nas populações de macaúba, sendo 12 em populações naturais e 8 em bancos de germoplasma (BAG). Marcadores genéticos, especialmente microssatélites, foram empregados em 10 estudos, enquanto 11 abordaram características biométricas das populações, com ênfase em atributos de frutos e óleos. A variabilidade morfológica e genética sugere maior diversidade interpopulacional em detrimento da diversidade intrapopulacional. Observa-se moderada herdabilidade, o que sugere caminhos para sua domesticação. A macaúba floresce de agosto a dezembro e produz folhas o ano todo. A polinização cruzada é predominante. Os principais polinizadores são coleópteros. A maturação dos frutos da macaúba demora pouco mais de um ano. A macaúba possui uma longa história de interação com comunidades humanas nas Américas, remontando a mais de 10.000 anos. Além de sua utilidade como alimento, a macaúba possui compostos bioativos valiosos, tornando-a relevante para as indústrias cosmética e alimentícia. Modelagens de distribuição mostram que a macaúba pode ser cultivada em diversas regiões

das Américas, apontando Cerrado e Mata Atlântica como os biomas mais adequados. Alguns estudos sugerem que mudanças climáticas possam alterar sua distribuição, ao passo que outros sugerem potencial aumento de produtividade em certas regiões. O plantio de macaúba emite menos gases do efeito estufa quando comparado com outras espécies oleaginosas como o girassol, a mamona e o pinhão manso. O cultivo sustentável, especialmente em agroflorestas, contribuiria significativamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, dada sua notável capacidade de sequestro de carbono. A macaúba revela-se uma fonte promissora de energia e alimentos, com sua variabilidade genética e resiliência a adversidades ambientais, tornando-a uma aposta valiosa na agricultura sustentável, alinhada às necessidades de descarbonização da economia global diante das mudanças climáticas.

Palavras chave: Macaúba; Aspectos Biológicos; Mudanças no Clima; Sustentabilidade

2.2 ABSTRACT

Considering the need to decarbonize the economy in response to climate change, organic energy sources have become increasingly in demand. In this context, macauba (*Acrocomia aculeata*), a palm native to the Americas, has emerged as a promising solution due to its remarkable oil productivity. Searches were performed using the Web of Science, Scopus and PubMed databases, using the terms "macaúba" and "*Acrocomia aculeata*". After analysis and selection, 91 studies were reviewed to examine macauba biology, providing a comprehensive, albeit not exhaustive, overview of its biological aspects. Of the studies analyzed, 21 focused on macauba populations, 12 on natural populations, and eight on germplasm banks (BAG). Genetic markers, especially microsatellites, were used in 10 studies, while 11 looked at biometric characteristics of populations, with an emphasis on fruit and oil attributes. Morphological and genetic variability suggests greater interpopulation diversity to the detriment of intrapopulation diversity. Moderate heritability is observed, which suggests avenues for domestication. Macauba blooms from August to December and produces leaves throughout the year. Cross-pollination is predominant. The main pollinators are coleopterans. The macauba fruit takes just over a year to ripen. The macauba tree has a long history of interaction with human communities in the Americas, dating back more than 10,000 years. In addition to its usefulness as a food, macauba has valuable bioactive compounds, making it relevant to the cosmetics and food industries. Distribution modeling shows that macauba can thrive in various regions of the Americas, with the Cerrado and Atlantic Forest being the most suitable biomes. Some studies suggest that climate change could alter its distribution, while others suggest a potential increase in productivity in certain regions. Planting macauba emits fewer greenhouse gases than other oilseed species such as sunflower, castor bean, and physic nut. Due to its remarkable carbon sequestration capacity, sustainable cultivation, especially in agroforestry, could significantly contribute to mitigating greenhouse gas emissions. Macauba is proving to be a promising source of energy and food.

Its genetic variability and resilience to environmental challenges make it a valuable asset for sustainable agriculture, aligning with the imperative to decarbonize the global economy in the face of climate change.

Keywords: Macaúba; Biological Aspects; Climate Changes; Sustainability

2.3 INTRODUÇÃO

Com as mudanças no clima que vêm se consolidando, há uma forte demanda pela descarbonização da economia, a qual está em progresso, mesmo que de forma diferente do ideal. A substituição da matriz energética fóssil por uma matriz orgânica parece uma solução óbvia, mas esbarra, pelo menos, no problema da sobreposição de recursos para produção de energia ou alimentos (BERTON et al., 2013).

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.) é uma palmeira (Arecaceae) nativa das Américas que vem sendo tratada na literatura e em projetos como uma grande promessa para solucionar o impasse do conflito entre produção de energia e alimentos (LEITE et al., 2013; MAIA et al., 2020; CORRÊA et al., 2018; CORRÊA et al., 2016; DIAS et al., 2018; COELHO et al., 2019; FERREIRA Da MOTTA et al., 2002; MAZZOTTINI-DOS-SANTOS et al., 2015; MONTOYA et al., 2016; ALFARO-SOLÍS et al., 2020; COSER et al., 2016; DOS REIS et al., 2019; BAZZO et al., 2018). Esse potencial se dá pela sua alta produtividade, mesmo em sistemas extrativistas e agroflorestais com macaubeiras não domesticadas, podendo atingir até 4000 litros de óleo por hectare em situações ótimas (MAIA et al., 2020; DINIZ et al., 2014; CORRÊA et al., 2018), e pela possibilidade de consorciamento com diversas modalidades de produção de alimentos, sejam de origem vegetal ou animal (DINIZ et al., 2014).

É uma espécie de ampla distribuição que ocorre em quase todos os biomas do Brasil, com ampla faixa de ocorrência nas Américas, desde a Flórida nos Estados Unidos até o norte da Argentina (SMITH, 2015; MOREIRA et al., 2019; CICONINI et al., 2013). Apesar desse atributo, é possível observar na literatura a propagação de algumas afirmações frágeis sobre a espécie. Tais afirmações passam desde a de que a macaúba é uma espécie indicativa de áreas degradadas, juntamente com a sua preferência por matas ciliares, assim como sua polinização anemofílica, ou mesmo que o fogo seja um promotor de quebra de dormência de suas sementes (LEITE et al., 2013; BICALHO et al., 2016; MONTOYA et al., 2016).

Alguns avanços já foram feitos nas pesquisas relacionadas à cadeia produtiva da macaúba, incluindo passos iniciais em seu processo de domesticação, mas ainda há um longo caminho a percorrer, especialmente no que se trata da domesticação de espécies perenes com ciclo de vida estendido (CARDOSO et al., 2017; DOS REIS et al., 2019).

Considerando o extrativismo da macaúba, que é amplamente realizado nas Américas, e suas diversas utilizações, é plausível que a mesma tenha uma grande afinidade com a espécie humana, o que se confirma tanto pelo registro arqueológico como por investigações etnobotânicas (QUIGLEY et al., 2017; MOREIRA et al., 2019; DE SOUZA et al., 2020; MORCOTE-RÍOS et BERNAL, 2001). Tendo em vista seu potencial como cultura agrícola que possa romper a sobreposição da produção de energia e alimentos, é importante reconhecer aspectos de sua biologia. Tais aspectos podem ser relevantes na busca por maior produtividade, assim como no manejo visando controlar eventuais dificuldades em sua produção, como ação de pragas e problemas com endogamia.

Este capítulo tem como objetivo compilar os avanços sobre a biologia da macaúba até o momento, lançando luz sobre os mesmos e, na medida do possível, indicar novos avanços, contribuindo para o estabelecimento dessa importante promessa para a mitigação e a resiliência dos efeitos das mudanças no clima.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

Foram consultadas as seguintes bases de dados de periódicos: Web of Science, Scopus e PubMed. Em todas elas, procedeu-se com a busca considerando os termos “macaúba” e “Acrocomia aculeata”. Foram considerados todo o período disponível, todos os campos e todos os tipos de documentos.

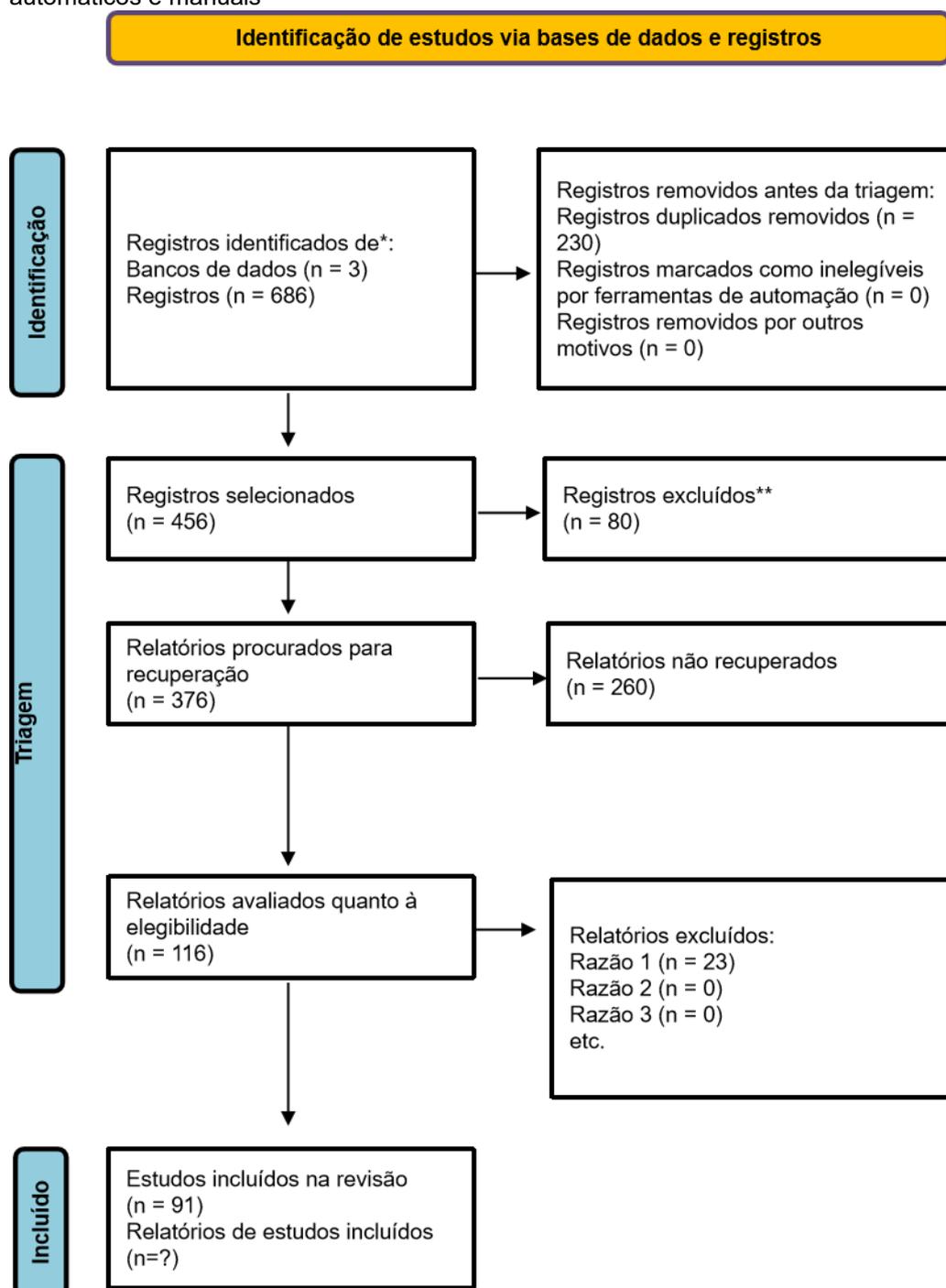
Os resultados obtidos em cada uma das bases foram salvos em seu formato original e, posteriormente, foram transformados nos formatos “bib” ou “nbib”, através do comando “convert2df” disponível no pacote de dados “Bibliometrix” em ambiente “R” (R CORE TEAM, 2022). Sendo assim, foram obtidos 321 registros a partir do Web of Science, 297 registros a partir do Scopus e 68 registros a partir do PubMed.

Durante a transformação, cada base de dados foi associada a um objeto e, posteriormente, foram agrupadas, executando-se o comando “MergeDbSources” com a opção de remoção de duplicatas ativada, restando 456 registros. Por fim, foi gerado um arquivo no formato planilha, considerando todos os campos de metadados.

Posteriormente, a base de dados foi aberta em planilha eletrônica, a partir da qual utilizou-se o procedimento de ordenação em ordem crescente, considerando-se o campo do registro DOI para verificação manual de duplicatas não removidas automaticamente, de maneira a restarem 376 referências bibliográficas. Em seguida, procedeu-se à busca por cada uma das referências, de modo que se obtivesse o material na íntegra.

Inicialmente, foram consultados título e resumo para exclusão de referências não relacionadas ao tema dessa revisão, como artigos que tratam de aspectos industriais, químicos, agrônômicos ou de outros temas não correlatos, das quais foram selecionadas 91 referências bibliográficas (Figura 1).

Figura 1 - Roteiro para seleção de artigos incluídos nessa revisão utilizando métodos automáticos e manuais



Fonte: PAGE *et al.*, 2021 com modificações

Por fim, procedeu-se à leitura na íntegra de todos os artigos, dos quais foram selecionadas as informações relevantes para delimitar o panorama atual dos aspectos biológicos da macaúba. Tal panorama foi estabelecido de forma não exaustiva, mas buscando cobrir os mais importantes aspectos da biologia da espécie.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Explora-se a seguir os resultados dessa revisão, dividindo-a em tópicos de modo a demonstrar os aspectos biológicos conhecidos da macaúba.

2.5.1 Populações

Dos 91 estudos analisados aqui, 21 referem-se a populações de macaúba. A maior parte deles (12 artigos) refere-se a amostragens na natureza contra oito estudos realizados em bancos ativos de germoplasma (BAG). Um estudo desenvolveu novos marcadores microssatélites (pequenas sequências com 1 a 4 nucleotídeos de comprimento, repetidas em tandem) a partir de amostras da natureza, os quais foram testados em amostras de banco de germoplasma.

Pouco mais da metade dos estudos (11 artigos) analisaram as populações sob a ótica da biometria, sendo que sete mediram atributos de frutos, cinco mediram atributos dos óleos dos frutos, três mediram aspectos fenológicos, outros três mediram aspectos vegetativos, e um fez medições de aspectos da fisiologia. Os outros 10 estudos fizeram as análises de populações a partir de marcadores genéticos, especialmente microssatélites, sendo que um deles utilizou a técnica RAPD (Random Amplified Polymorphic DNA).

Os estados brasileiros onde mais se investigaram populações de macaúba foram Minas Gerais (em 14 dos 21 artigos) e São Paulo (em 13 dos 21 artigos). Os estados de Mato Grosso do Sul, Goiás e o Distrito Federal tiveram populações de macaúba investigados em quatro artigos, enquanto Pernambuco, Pará e Mato Grosso tiveram populações investigadas em três artigos. Tocantins, Paraíba e Maranhão tiveram populações de macaúba

investigadas em dois artigos, enquanto Rio de Janeiro e Bahia, juntamente com a Costa Rica, tiveram populações de Macaúba investigadas em apenas um artigo cada (Tabela 1).

Tabela 1 - Relação dos trabalhos com genética de populações de *Acrocomia aculeata* (macaúba) abordadas no estudo

Tipo de População	Fonte de Dados	Parâmetro Analisado	Localidades Estudadas	Artigo
	Marcadores			
BAG	Genéticos	Microsatélite	MG, SP	Bazzo <i>et al.</i> , 2018
	Marcadores			
Natureza	Genéticos	Microsatélite	MG	Araújo <i>et al.</i> , 2017
	Marcadores			
Natureza, BAG	Genéticos	Microsatélite	MG, SP	Montoya <i>et al.</i> , 2016
	Marcadores		SP, DF, RJ, MG,	
Natureza	Genéticos	Microsatélite	BA, TO, MA,	De Lima <i>et al.</i> , 2020
	Marcadores		GO, MT, MS	
BAG	Genéticos	Microsatélite	PA, PE, PB, SP,	Mengistu <i>et al.</i> , 2016
	Marcadores		MG, MS	
BAG	Genéticos	Microsatélite	SP, MG, MS,	Lanes <i>et al.</i> , 2015
	Marcadores		PA, PB, PE	
Natureza	Genéticos	Microsatélite	SP	Abreu <i>et al.</i> , 2012
	Marcadores			
Natureza	Genéticos	Microsatélite	SP	Coelho <i>et al.</i> , 2018
	Marcadores			
Natureza	Genéticos	Microsatélite	SP	Portela <i>et al.</i> , 2020
Natureza	Biometria	Frutos, Óleo	Costa rica	Alfaro-Solís <i>et al.</i> , 2020
Natureza	Biometria	Frutos, Óleo	MS	Ciconini <i>et al.</i> , 2013
BAG	Biometria	Vegetativos, Fenológicos	MG, SP	Coser <i>et al.</i> , 2016
Natureza	Biometria	Frutos, Óleo	GO	Dos Reis <i>et al.</i> , 2016
	Marcadores			
Natureza	Genéticos	RAPD	MG	Oliveira <i>et al.</i> , 2012
	Marcadores		MG, GO, TO,	
Natureza	Biometria	Óleo	DF	Da Conceição <i>et al.</i> , 2015
BAG	Biometria	Frutos, Fenológico	DF, MG, SP, GO	De Sá <i>et al.</i> , 2021
BAG	Biometria	Vegetativos, Fisiologia	MG, DF	Domiciano <i>et al.</i> , 2015
BAG	Biometria	Frutos, Óleo	MG, SP	Costa <i>et al.</i> , 2018
	Marcadores			
BAG	Biometria	Frutos, Óleo	MG, SP	Simiqueli <i>et al.</i> , 2018
Natureza	Biometria	Frutos	MT	Vianna <i>et al.</i> , 2013
	Marcadores		MG, SP, MS,	
Natureza	Biometria	Frutos	PA, MA, PE	Manfio <i>et al.</i> , 2011

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Estudos sobre populações de macaúba têm observado notável variabilidade de caracteres morfológicos (ALFARO-SOLÍS *et al.*, 2020; CICONINI *et al.*, 2013; VIANNA *et al.*, 2013; DOS REIS *et al.*, 2016; DA CONCEIÇÃO *et al.*, 2015). Há variação na biometria de frutos (CICONINI *et al.*, 2013), em que atributos que contribuem notavelmente para variabilidade são a massa e o diâmetro do fruto, o percentual de óleo da amêndoa (DOS REIS *et al.*, 2016), assim como a coloração do epicarpo e mesocarpo (VIANNA *et al.*, 2013).

Atributos como número de frutos, número de cachos, volume de fruto e massa dos frutos são responsáveis por alto percentual de explicação da variância em análises multivariadas (DE SÁ *et al.*, 2021). Pode ser obtida correlação positiva do teor de óleo da polpa com precipitação, umidade relativa e textura do solo (ALFARO-SOLÍS *et al.*, 2020), porém não necessariamente há correlação entre teor de óleo e biometria (CICONINI *et al.*, 2013).

A produção de óleo por planta depende mais do número de frutos por planta do que da quantidade de óleo na polpa (COSTA *et al.*, 2018). Dos constituintes dos óleos provenientes dos frutos de macaúba, ácido oléico e linoleico na polpa e ácido laurico na amêndoa contribuem mais para divergências e diferenciação de genótipos (DA CONCEIÇÃO *et al.*, 2015). Tem sido observada grande variação no percentual de óleo na polpa, indo de 14% a 70%. (DA CONCEIÇÃO *et al.*, 2015)

Alguns estudos sugerem, pelo menos, moderada herdabilidade, o que pode ser útil para programas de seleção de ideótipos (DE SÁ *et al.*, 2021; MANFIO *et al.*, 2011). Em alguns casos, a partir de análises multivariadas foi constatada formação de grupamentos correlacionando caracteres morfológicos, genéticos e funcionais ao contexto geográfico (DOS REIS *et al.*, 2016; DA CONCEIÇÃO *et al.*, 2015; DE SÁ *et al.*, 2021). Aponta-se Minas Gerais e São Paulo como centro de diversidade e possivelmente de origem, a partir da observação destas localidades como principal repositório de genes ou alelos, onde observou-se alto nível de diversidade genética ao se considerar a população de macaúba em nível nacional (LANES *et al.*, 2015).

Constatou-se controle genético para atributos como arquitetura de plantas, rendimento de óleo e matéria seca da polpa (DOMICIANO *et al.*,

2015; COSTA *et al.*, 2018). Por outro lado observou-se uma baixa variabilidade para caracteres fisiológicos (DOMICIANO *et al.*, 2015). Vários estudos apontam para maior diversidade intrapopulacional em detrimento de diversidade interpopulacional. Nesse contexto, argumenta-se sobre sistema reprodutivo misto com predomínio de alogamia. Em tais estudos aborda-se a baixa mobilidade de polinizadores e o déficit de dispersores, o que pode indicar degradação ambiental. Nos casos em que se observa fluxo gênico, infere-se sobre uma melhor qualidade ambiental que eventualmente esteja favorecendo principalmente dispersores de grande porte como aves e mamíferos. (ABREU *et al.*, 2012; LANES *et al.*, 2015; COELHO *et al.*, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2012; DE LIMA *et al.*, 2020; MENGISTU *et al.*, 2016).

Pode ser observada correlação entre atributos do estágio inicial do desenvolvimento da planta como: precocidade, total de espatas, diâmetro à altura do peito, altura da primeira espata e área do dossel. Tais atributos podem apresentar de moderada a alta herdabilidade. Considerando que o valor fenotípico médio é bom preditor de valor genético, tais correlações podem ser úteis na domesticação de uma espécie que é perene e precisa ser produzida em larga escala (COSER *et al.*, 2016).

Também pode haver alta correlação genética para traços produtivos, especialmente para número de inflorescências por planta. Por outro lado, traços relacionados com produtividade podem apresentar maiores valores de depressão endogâmica, especialmente aborto de frutos, sendo estes regidos por efeitos dominantes (SIMIQUELI *et al.*, 2018).

Pode ser encontrada correlação significativa entre distância genética e ambiental em ampla escala no Brasil, em que alguns haplotipos podem estar associados a biomas distintos. Isso pode sugerir que as populações de macaúba estavam fortemente conectadas no passado, indicando uma expansão recente da espécie (SILVA *et al.*, 2018). As populações de macaúba podem apresentar diferenças na diversidade genética quando analisadas em contexto regional, o que sugere isolamento genético associado à distância geográfica (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

A taxonomia do gênero *Acrocomia* ainda não está completamente resolvida, tendo-se diferentes sistemas de classificação com limites e

quantidade de táxons discordantes. Testando-se ecotipos de *Acrocomia aculeata* e *Acrocomia totai* com microssatélites, foram observados clusters genéticos que reúnem cada ecotipo. *A. aculeata* apresenta maior diversidade intrapopulacional que *A. totai*, sendo observada alta diversidade genética como um todo, porém, uma menor diversidade genética quando comparada a outras espécies de palmeiras nativas de distribuição geográfica similar. Apesar disso, algumas populações de ecotipos *Acrocomia* apresentaram perda de diversidade genética em função de gargalos (eventos demográficos que reduzem o tamanho da população, levando à perda da diversidade genética), por estarem associadas a áreas de intenso uso do solo (DE LIMA *et al.*, 2020). Eventualmente podem ocorrer hibridizações entre *A. aculeata* e *A. totai* como sugerido pelo grupo diferenciado de *A. aculeata* localizado mais a oeste em amostragem que abrangeu populações de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro (ABREU *et al.*, 2012).

Populações de macaúba podem apresentar altos níveis de polimorfismo, assim como excesso de homozigose devido à restrições no fluxo gênico, provavelmente em função de limitações na dispersão e polinização. Observando a correlação multilocus de paternidade pode-se inferir que a probabilidade de dois indivíduos compartilharem os mesmos pais é baixa e não significativa, contradizendo o argumento de sistema reprodutivo misto para a população estudada. Considerando a detecção de populações não estruturadas, pode-se sugerir fluxo gênico associado a uma menor pressão antrópica e também a uma eventual maior densidade de indivíduos que pode dar maior suporte a dispersores. (COELHO *et al.*, 2018).

Quando analisadas sob uma abordagem coalescente para verificar fluxo gênico, pode-se inferir fluxo gênico histórico para macaúba. Nesse caso, dentre as populações estudadas, a que doou mais migrantes foi a mais distante, confirmando a importância da migração em relação à mutação para introduzir maior variabilidade genética em uma população (PORTELA *et al.*, 2020).

Nesse contexto, recomenda-se que novos estudos aumentem a amostragem do número de *loci* para maior acurácia, assim como a consideração do efeito de populações não amostradas ao estimar de forma confiável tamanho efetivo de população e taxas históricas de fluxo gênico

entre populações de macaúba. Sendo assim, a utilização de novos marcadores microssatélite pode ser útil ao separar bem diferentes espécies de palmeiras, assim como populações de macaúba. (BAZZO *et al.*, 2018)

Pode ser observada tendência a uma menor diversidade genética para progênie quando comparada aos adultos em populações analisadas sob escala fina. Portanto, a estrutura genética pode sugerir distância curta entre parentes, com menos de cinco metros, indicando comportamento barocórico na dispersão de sementes, o que corrobora a possibilidade de degradação ambiental afetando dispersores (ARAÚJO *et al.*, 2017).

2.5.2 Performance Biológica da Macaúba

A seguir apresentam-se os aspectos conhecidos sobre a performance biológica da macaúba. São tratados os tipo de solo e clima, fotossíntese, floração e frutificação, raízes, além de sementes e germinação.

2.5.2.1 Tipos de Solo e Clima

A macaúba está adaptada a uma grande variedade de níveis de acidez do solo, principalmente os argilosos (COELHO *et al.*, 2019). No entanto sua distribuição em áreas de drenagem deficiente é limitada, afetando negativamente o peso e tamanho do fruto (COELHO *et al.*, 2019 e FERREIRA Da MOTTA *et al.*, 2002). Parâmetros como DAP (diâmetro à altura do peito), tamanho e peso do fruto podem ser afetados por tipos climáticos, sendo que em áreas de clima CwA (clima subtropical úmido) tais valores podem ser maiores. De forma geral, observa-se alta plasticidade morfológica entre populações. Em análise multivariada, o clima pode ser o último fator a ser diferenciado entre localidades, ao passo que pH do solo pode ser o principal fator de diferenciação entre elas. Eventualmente a

macaúba prefere solos com menores valores de saturação por alumínio, especialmente os solos florestais originais (FERREIRA DA MOTTA *et al.*, 2002). As populações de macaúba podem apresentar gradiente relacionado à fertilidade do solo e distribuição textural. Tais elementos do solo podem afetar atributos botânicos relacionados à produtividade, como tamanho e peso do fruto, quando se considera uma análise de redundância. Isso reforça a importância da matéria orgânica em decomposição (MOD) do solo como vetor de maior importância em uma análise de redundância. Considerando a perspectiva de cultivo, um bom manejo do solo pode incrementar a produtividade incluindo correção de acidez quando necessário, adubação e manutenção de matéria orgânica (COELHO *et al.*, 2019).

2.5.2.2 Fotossíntese

Durante o período chuvoso, a macaúba realiza maiores trocas gasosas e, durante o período seco, reduz sua condutância estomática, aumentando sua eficiência no uso da água (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Quando submetida ao ponto máximo de estresse, a taxa de assimilação de CO₂ chega próxima a zero, reduzindo a fotossíntese, mas recuperando-se após a reidratação (MOTA *et al.*, 2016). Sendo assim, há uma tolerância ao estresse causado pela seca, apesar da redução na acumulação de matéria seca durante o período de estresse (OLIVEIRA *et al.*, 2016; MOTA *et al.*, 2016). Aponta-se para uma resiliência do aparato fotossintético às alterações na temperatura, permitindo que a macaúba tolere altas temperaturas e eventual escassez de água (PIRES *et al.*, 2013).

A resposta à densidade de fluxo de fótons fotossintético (ppfd) para a macaúba varia, apresentando o pico da taxa de fotossíntese um pouco antes das 10 horas da manhã. Sua curva de resposta fotossintética segue o padrão de espécies C3. Observa-se eficácia fotossintética consideravelmente alta, podendo iniciar o processo de assimilação de carbono em condições de luz diminutas. A macaúba apresenta absorção de luz eficiente, minimização em

custos respiratórios e baixos valores de ponto de compensação luminosa, contribuindo para um metabolismo de carbono efetivo. Por não possuir crescimento secundário "real", estoca uma extraordinária quantidade de sacarose em seu tronco, o que sustenta crescimento vegetativo substancial e ciclos de produção prolongados, alocando recursos obtidos pela fotossíntese na produção de cargas pesadas de frutos (PIRES *et al.*, 2013; MONTOYA *et al.*, 2016). Seus pigmentos fotossintéticos e minerais correlatos são relativamente constantes entre folhas jovens e mais velhas, o que é esperado para folhas funcionais persistentes (PIRES *et al.*, 2013).

Quando exposta a condições de CO₂ aumentadas, a macaúba pode apresentar uma resposta fotossintética melhorada, maior condutância estomática e aumento das eficiências do uso da água e da luz, indicando uma regulação positiva com o incremento de CO₂. Sua recuperação após reidratação nessas condições é mais rápida, o que a torna apta a prevenir a redução de massa seca total. Sendo assim, a planta tem potencial para se adaptar às mudanças no clima que vêm se apresentando e que englobam maiores concentrações atmosféricas de CO₂ (ROSA *et al.*, 2019).

Mudas de macaúba apresentam alguns ajustes na eficiência da captura de luz, em que o procedimento de rustificação parece não ser vantajoso durante a fase pré-berçário, já que não promove melhores respostas de aclimação a ambientes com luminosidade contrastante. Sendo assim, mudas de macaúba modulam sua fisiologia de acordo com o ambiente circundante, de maneira que mudanças repentinas de ambiente sombreado para ambiente iluminado não causam fotoinibição em suas folhas. Isso ocorre em função de ajustes fisiológicos para melhorar seu crescimento sob dossel ou sombreamento por nuvens e posteriormente em condições de clareira ou céu sem nuvens. Não são observadas mudanças significativas na anatomia foliar de mudas submetidas a condições luminosas contrastantes, visto que a fotossíntese é ajustada em diferentes condições luminosas através da modulação da eficiência na captura de luz em condições de baixa luminosidade e maximização da eficiência fotossintética com dissipação de energia não fotossintética em condições de excesso de luminosidade (DIAS *et al.*, 2018).

Os traços ecofisiológicos da troca gasosa de macaúba são similares aos do dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.), palmeira africana responsável pela produção de um dos maiores volumes de óleos vegetais em escala global. Ao contrário do dendê, a macaúba está adaptada a uma variação ambiental maior, o que a torna tão produtiva quanto o dendê, mas melhor adaptada a variações ambientais (PIRES et al., 2013).

2.5.2.3 *Floração e Frutificação*

A macaúba floresce de agosto a dezembro e produz folhas o tempo todo. Seu período de frutificação coincide com o da floração, se estendendo um pouco mais de um ano em relação à última (SCARIOT et al., 1991). As primeiras inflorescências a se abrirem eventualmente não produzem frutos, mas podem ser importantes para a manutenção dos polinizadores (SCARIOT et al., 1995). As florações podem variar entre indivíduos, emitindo inflorescências em média três vezes em um ano, sendo que alguns o fazem apenas uma vez no ano (MAZZOTTINI-DOS-SANTOS et al., 2015; SCARIOT et al., 1991).

As flores de macaúba podem apresentar alta variabilidade em suas medidas, eventualmente influenciadas pela área de origem do material coletado, o que corrobora a alta variabilidade genética entre indivíduos e populações. Suas inflorescências, que são do tipo panícula com comprimento médio de 117 cm, contêm flores unissexuais arranjadas em espiral pela ráquila (MAZZOTTINI-DOS-SANTOS et al., 2015). A abertura da bráctea é noturna, onde as flores femininas ficam receptivas durante as primeiras doze horas após a abertura de brácteas, que é acompanhada pela liberação de odor doce intenso (produzido por osmóforos), seguida da chegada de insetos (especialmente besouros e abelhas) (MAZZOTTINI-DOS-SANTOS et al., 2015; SCARIOT et al., 1991).

A polinização cruzada é predominante, mas pode haver autopolinização, sendo que a protoginia é considerada como um mecanismo

para evitar a autopolinização (MAZZOTTINI-DOS-SANTOS et al., 2015). Os potenciais polinizadores são coleópteros dos táxons *Andranthobios*, *Mystrops* cf. *mexicana* e *Cyclocephala fosteri*. Eles chegam no pôr do sol ou início da noite e usam a inflorescência como sítio de cópula e alimentação, deixando seus ovos lá por último. O período relativamente longo de floração de inflorescências individuais disponibilizando flores masculinas, juntamente ao longo período de floração na população como um todo, aumenta a possibilidade de fecundações cruzadas, reduzindo a autopolinização. A polinização por besouros está evidente, ao invés de suposta polinização pelo vento (SCARIOT et al., 1991).

O pico de frutificação da macaúba (*fruiting set* - proporção de frutos e flores femininas) pode se dar em outubro e novembro. A frutificação pode ocorrer em 14% das inflorescências de forma que a maioria das inflorescências efetivamente converte apenas 10% de suas flores femininas em frutos. Pode ocorrer predominância de infrutescências com menos de 30 frutos, as quais podem apresentar até 271 frutos, com produção média de 60 frutos. Além disso pode haver tendência na manutenção do número de inflorescências por planta ao longo dos anos, de forma que plantas mais altas normalmente produzem mais inflorescências. O tamanho da planta, o número de flores femininas, o número de inflorescências e o número de ráquias não é indicativo de uma maior proporção de flores femininas convertidas em frutos. A proporção de flores femininas convertidas em frutos está relacionada à ação de polinizadores juntamente à disponibilidade de recursos produzido pela planta mãe, o que por sua vez pode estar relacionado com a nutrição vegetal de cada indivíduo. Isso tendo em vista que foi observada diferença de 65% de conversão de flores femininas em frutos a partir da polinização manual e 13% a partir da polinização natural (SCARIOT et al., 1995).

Macaúbas em florestas secundárias desconectam seus frutos de seus cachos durante mais tempo que em floresta madura e pastagem, sendo que o pico desse evento pode variar entre esses três tipos de vegetação. Observou-se que 95% dos frutos se soltaram naturalmente dos cachos, sendo que os mesmos caíram em média 1,24 metros de distância da planta mãe (SCARIOT et al., 1995).

A frutificação completa de macaúba demora um pouco mais de um ano. O exocarpo é a primeira parte do fruto a se desenvolver completamente. Ele tem função protetiva dos tecidos internos em formação. Nesse caso o exocarpo influencia o tamanho final do fruto. É importante observar que a desidratação contínua ao longo do processo de maturação não é causa de murchamento como no caso da tamareira. O padrão de crescimento do fruto de macaúba é sigmoidal com crescimento descontínuo, o que já é esperado para espécies drupáceas (MONTROYA et al., 2016).

2.5.2.4 Raízes

Ao contrário do esperado para palmeiras, a distribuição de raízes nos estágios iniciais de desenvolvimento da macaúba não ocorre radialmente a partir do caule de maneira homoganeamente fasciculada. A distribuição tende a ser inequilátera, concentrando-se na parte tuberosa do caule, que lembra o formato de um saxofone. No entanto, essa distribuição fica mais homogênea a partir do nono ano. As dimensões das raízes de macaúba são menores que as da palma africana, o que pode ser associado às diferentes dimensões de copas de indivíduos das duas espécies da mesma idade. O carbono estimado para raízes com nove anos é de 16,15 toneladas por hectare na distribuição 5x5 (400 indivíduos por hectare). Nesse sentido, o estoque de carbono abaixo do solo é similar ao do dendê (*Elaeis guineensis*), que requer maior espaçamento entre indivíduos devido às suas maiores dimensões. A maior parte das raízes se concentra nas camadas superficiais do solo em plantas com até 9 anos. Em plantas jovens (até 1,6 anos), quase 80% das raízes cresce no lado do caule saxofone. A concentração de raízes em um lado sugere a possibilidade de economia na aplicação de fertilizantes, concentrando-se no lado onde abundam raízes, especialmente nos anos iniciais de crescimento. Escolher o lado em que estão as raízes e orientá-las em campo de maneira adequada para fins de manejo, incluindo fertilização do solo, pode ser interessante. No entanto, não é tão fácil saber o lado certo

do caule tuberoso saxofone, pois as mudas na maioria das vezes vêm em saquinhos. Por outro lado, geralmente o lado da planta com mais folhas coincide com o lado do caule saxofone (MOREIRA et al., 2019).

2.5.2.5 Sementes e Germinação

Diásporos da maioria das palmeiras têm dormência morfofisiológica (*morphophysiological dormancy* – MPD). Nesses casos, o endocarpo duro inibe a germinação de sementes, de maneira que, quando removido, as sementes germinam melhor. O endocarpo é permeável à água e gases (como o oxigênio) e todas as palmeiras têm germinação hipógea. Além de restrições de germinação causada pelo endocarpo, o opérculo de sementes, no caso específico da macaúba, pode retardar a germinação, e a remoção mecânica do endosperma micropilar (tampa do endosperma) pode promover a germinação (BASKIN et BASKIN, 2014).

As estruturas da semente de macaúba limitam a embebição, demorando até 24 horas em embriões isolados e até 96 horas em sementes sem opérculo. Não há dormência física causada pela restrição do acesso da água ao embrião, visto que sementes sem opérculo foram embebidas após período igual ao daquelas com opérculo. A dormência em macaúba é fortemente influenciada pela interação entre estruturas do embrião e opérculo. A remoção do opérculo promove germinação, o que indica seu papel na dormência. Já a remoção do opérculo e uso de ácido giberélico promove a superação da dormência em mais de 50%. A razão do comprimento do embrião com a espessura do opérculo está diretamente relacionada com a germinabilidade: quanto mais espesso e menos comprido (opérculo/embrião), menor a germinabilidade. Apesar de haver remoção da casca e da polpa dos frutos de macaúba por dispersores, o pirênio (endocarpo mais amêndoa) pode retardar a absorção de água. Nesse sentido, a dormência prolongada e as condições ortodoxas da semente são habilidades críticas para a formação de bancos de sementes do solo persistentes (PEREIRA et al., 2014).

Pode haver variação de 19% a 98% nas taxas de germinação entre diferentes progênies, assim como em traços juvenis. Progênies com altas taxas de velocidade de germinação podem apresentar baixo crescimento inicial e diâmetro de colo aumentado. Isso pode ser desejado para seleção, pois plantas mais baixas com maiores DAP podem ser mais produtivas. Aplicações consecutivas de GA (ácido giberélico) (total de 72 horas de aplicação por três vezes) promovem e aumentam o percentual de germinação. Isso especialmente após a segunda aplicação, depois de quatro semanas. A combinação de hidratação, escarificação e tratamento hormonal tem sido demonstrado como o método mais eficiente para germinação. Velocidades de germinação mais rápidas são importantes para uniformidade na germinação e para evitar doenças na fase de pré-germinação. Variação nas taxas e velocidade de germinação entre populações também é encontrada em outras espécies de palmeiras (BERTON et al., 2013).

Os traços vegetativos iniciais podem ser usados para seleção de genótipos superiores. Os valores de herdabilidade para esses traços podem ser considerados altos, indicando que traços para germinação e vegetativos iniciais podem ser mais influenciados por genes do que pelo ambiente. Taxa e velocidade de germinação estão correlacionadas de forma alta e positiva, demonstrando possível correlação genética. Também pode ser observada alta correlação genética entre massa da semente e altura da planta (BERTON et al., 2013).

Quando frutos de macaúba na natureza são expostos ao fogo, podem não ser encontradas diferenças significativas na viabilidade de suas sementes quando comparados a frutos não expostos ao fogo. Além disso, sementes provenientes de frutos expostos parcialmente ao fogo podem ter uma média de viabilidade semelhante às não expostas (ou expostas minimamente). Dessa forma, as estruturas do fruto protegem sementes dos efeitos de altas temperaturas geradas pelo fogo. Por outro lado, não há evidências de que o fogo seja um agente de seleção natural para os traços de frutos de macaúba. Nesse sentido, a estrutura lignificada do endocarpo está mais relacionada à proteção da semente contra predadores de sementes. Caracteres biométricos do fruto podem ser afetados pelo fogo (exocarpo e mesocarpo) e acabam contribuindo com o papel protetivo para

semente. Nesse sentido, o fogo altera a disponibilidade para uso de polpa com fins industriais. Palmeiras (como a macaúba) podem superar o efeito do fogo, sendo observada baixa mortalidade de indivíduos adultos após tais eventos. Isso se dá pela ausência de tecidos meristemáticos de câmbio na parte superficial do estipe. O endocarpo da macaúba não impede a movimentação de água para a semente, e eventualmente a ação do fogo escarifica o tegumento e rompe a testa da semente através do derretimento da capa de cera da semente, promovendo a embebição da mesma. De toda forma, a ação do fogo tem um limite que, se for excedido, pode ser letal para sementes. Associa-se uma possível mudança na regra de montagem de comunidades quando eventos de fogo se tornam mais frequentes com aumento da dominância de espécies vegetais resistentes ao fogo. Isso pode explicar a possível falsa premissa de que a macaúba é uma espécie pioneira, quando a mesma acaba por sobreviver de sucessivos eventos de fogo que eliminam o restante da comunidade arbórea original. Além disso, a resistência ao fogo pode ser um atributo que promoveu a dispersão da macaúba no Cerrado (BICALHO et al., 2016).

Sementes de macaúba expostas à embebição em temperaturas de 70 °C por mais de 5 minutos perdem a grande maioria de sua viabilidade. Tratamentos termais em condições similares, porém abaixo de 5 minutos de exposição a 70 °C, não favoreceram a germinação. Temperaturas do germinador de 35 °C e 40 °C podem resultar em perda de viabilidade de sementes aos 60 e 15 dias respectivamente. A condição da semente no pirênio na natureza faz com que ela tenha vias de proteção de uma testa dura quando comparada a sementes de outras espécies que resistem ao fogo. De acordo com citações, a temperatura do solo a um centímetro de profundidade não ultrapassa 55 °C durante eventos de incêndios, o que passa longe da temperatura de 70 °C (RODRIGUES-JUNIOR et al., 2016).

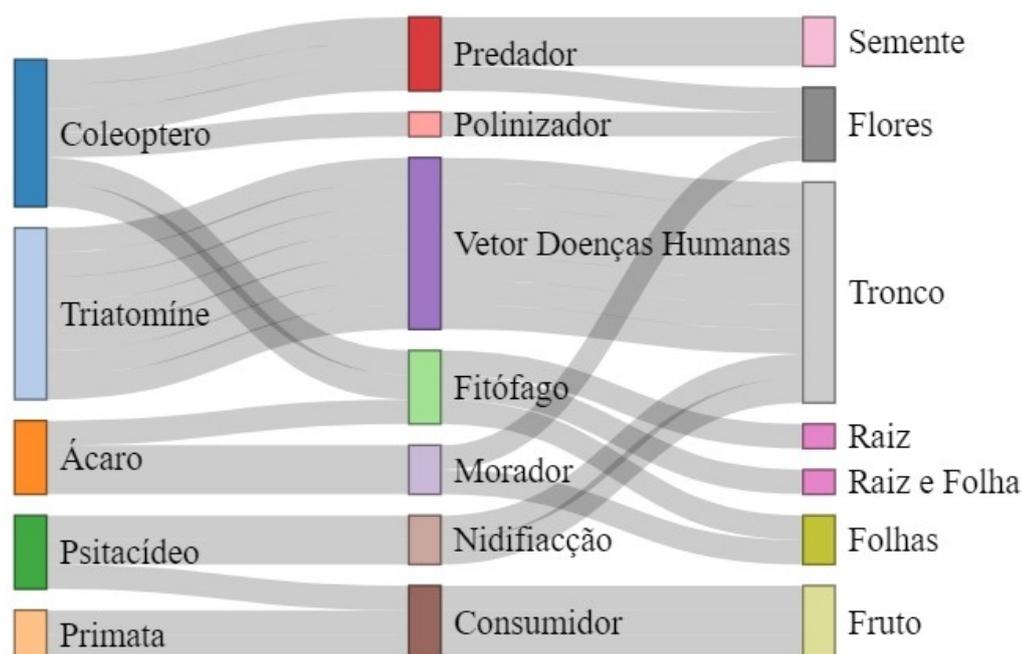
Uma curiosidade interessante é que pirênios de macaúba podem ser transportados por águas intercontinentais, sendo que foram reportados pirênios de macaúba no litoral da Irlanda (QUIGLEY et al., 2017). Apesar do material transportado por longas distâncias chegar ao outro lado do Atlântico já inviável, é plausível sugerir que tal meio de transporte de diásporos pode ter tido um papel importante durante a fase inicial de evolução do grupo, o

qual sugere-se ser parente próximo do gênero *Elaeis* (NAYAR, 2016). Esse encontra-se principalmente no continente africano, o qual encontrava-se a distâncias oceânicas significativamente menores que as atuais no Cretáceo (MAURIN et GUIRAUD, 1993).

2.5.3 Ecossistema Macaúba

São reportados alguns organismos nativos e exóticos associados à macaúba, dentre os quais se incluem vegetais, animais vertebrados e invertebrados, além de microrganismos. A espécie humana também está fortemente associada à macaúba, mas será alvo de tópico à parte. Vegetais podem estar associados em assembleias do mesmo hábito da macaúba ou associados em extratos verticais distintos. Os microrganismos reportados associados à macaúba podem estar no solo, sendo esses especialmente procariontes. Também são reportadas alterações na microbiota gastrointestinal de caprinos e ovinos ao se administrar torta de macaúba em suas dietas, sendo especialmente eucariotos nesse caso. Também são reportados microrganismos promotores da fermentação da polpa do tronco de macaúba, que gera uma bebida alcoólica amplamente consumida na América Central. Já os animais reportados são consumidores de alguma parte da planta, podendo gerar dano ou não a ela. Consumidores que geram dano podem atacar raízes, folhas e sementes. Consumidores reportados que não causam danos às estruturas vegetativas são primatas e psitacídeos (Figura 2).

Figura 2 - Organismos e suas relações com macaúba incluindo tipo de relação ecológica e partes da planta onde ocorrem tais relações



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

2.5.3.1 Vegetais

Na Costa Rica, foram registradas 68 espécies de árvores em pastagem, com 32 indivíduos por hectare, sendo que 12 espécies compõem 72% dos indivíduos. Espécies com copas densas apresentaram menor disponibilidade de pasto com braquiária (*Urochloa* sp.). Macaúba apresentou maior cobertura de pastagem abaixo de suas copas, ao contrário de outras espécies de árvores (VILLANUEVA et al., 2008).

Também na Costa Rica, um estudo realizado em 836 hectares de pastagem registrou 53 hectares de cobertura de copa. Foram observadas 99 espécies, sendo 7 indivíduos por hectare. A macaúba é uma das espécies mais abundantes e frequentes nesse estudo (ESQUIVEL-MIMENZA et al., 2011).

Em estudo florístico para palmeiras no estado brasileiro do Rio Grande do Sul (região sul do Brasil), foram registradas 15 espécies, excluindo-se *Acrocomia aculeata*. Exemplares conhecidos para o estado são cultivados. Nesse caso, tanto *Acrocomia aculeata* quanto *Acrocomia totai* são consideradas cultivadas e eventualmente dispersas, direta ou indiretamente, por ação antrópica no estado (SOARES et al., 2014).

Também em estudo florístico em Lavras (Minas Gerais - região sudeste do Brasil), foram registradas cinco espécies nativas de palmeiras, incluindo *Acrocomia aculeata*. Outros estudos de flórua para Minas Gerais como Grão Mogol e Serra do Cipó também apresentaram a espécie associada a campos rupestres (MARCATO & PIRANI, 2001; MARCATO et PIRANI, 2006; ALVES et al., 2010).

Foi registrada a utilização de macaúba por *Vanilla palmarum* como seu forófito pela primeira vez (BARBERENA et al., 2019). Nesse caso, seria interessante estudar mais sobre o epifitismo em macaúba, visto que a espécie é altamente favorável ao estabelecimento de epífitas na base persistente de suas folhas decíduas.

2.5.3.2 *Microorganismos*

Foi calculado o coeficiente microbiano em solos de cultivo de macaúba, mas os microorganismos não foram descritos nos estudos de LEITE et al. (2013) e DINIZ et al. (2014). Foi registrado um maior coeficiente microbiano em pastagem bem manejada quando comparado ao sistema agroflorestal (SAF) com macaúba e vegetação nativa, assim como foram observadas diferenças significativas nesse coeficiente quando comparadas as estações chuvosa e seca.

Também foi verificada alteração na flora gastro-intestinal de ovinos (SANTOS et al., 2017) com redução da diversidade (12 morfoespécies sem administração de torta de macaúba e sete morfoespécies com administração de torta de macaúba), mas isso não comprometeu o ganho de peso dos

animais estudados. Em caprinos (RUFINO et al., 2011) não foram observadas alterações expressivas na flora gastrointestinal com administração de torta de macaúba, onde houve a manutenção das morfoespécies ocorrentes sem administração de torta de macaúba.

Outra associação de microrganismos com a macaúba refere-se à produção de bebida alcóolica fermentada feita a partir da polpa da estipe de macaúba, o coyol ou taberna. Foram registradas 15 espécies de bactérias, sendo que predominou *Zymomonas mobilis* durante o processo de fermentação (ALCÁNTARA-HERNÁNDEZ et al., 2010). Já *Candida tropicalis*, *Hanseniaspora quillemondii* e *Saccharomyces cerevisiae* foram as leveduras mais comuns nesta bebida (SANTIAGO-URBINA et al., 2015).

Houve o registro de um vírus de fitoplasma em macaúba, que foi considerado um novo promotor da patologia vegetal “amarelo letal” para a espécie (ROCA et al., 2006). Também foram relatadas duas espécies de fungos patogênicos (*Exosporium acrocomiae* e *Passalora acrocomiae*) que causam manchas nas folhas de macaúba, sendo uma delas nova (GUATIMOSIM et al., 2012).

2.5.3.3 Animais

A seguir apresentam-se os grupos taxonômicos de animais com registros de associação conhecidos na literatura selecionada para macaúba.

2.5.3.3.1 Artrópodes

Foram reportadas sete espécies de coleópteros - Scarabeidae fitófagos de raiz, sendo uma espécie indeterminada de *Astanena*, *Cyclocephala verticalis*, uma espécie indeterminada de *Leucothyreus* e *L. dorsalis*, e duas espécies indeterminadas de *Phyllophaga* (Puker et al., 2009).

Dysmicoccus brevipes - Pseudococcidae - também conhecido como cochonilha do abacaxi, foi reportado pela primeira vez atacando macaúba. No estudo, metade das plantas (jovens) na amostragem foram atacadas. Foi observada forte dependência espacial, com ataques começando das bordas do plantio indo em direção ao centro. As plantas mortas foram observadas sempre rodeadas de plantas doentes, de maneira que foi observada alta mortalidade (ca. 12%) e severa redução de desenvolvimento (ca. 35%). Os danos são causados pela sucção da seiva, toxinas e eventual infecção secundária por vírus. Observou-se concentração de ninfas na raiz, o que pode favorecer os insetos, protegendo-os de predadores e aumentando os danos à planta. O comportamento reprodutivo de partenogênese favorece o aumento da colônia, juntamente à associação com formigas (*Solenopsis*) que se alimentam de *honeydew*. Os dados desse estudo sugerem que a braquiária pode servir como barreira para dispersão de cochonilha (DE ARAÚJO *et al.*, 2021).

Pachymerus cardo e *Specimerus revoili* (Bruchinae) são besouros predadores de sementes de macaúba. Suas fêmeas depositam vários ovos no fruto (em suas diferentes partes) mas apenas uma larva se estabelece na amêndoa (sendo que mais de uma larva pode perfurar o endocarpo). Observou-se alta mortalidade de ovos (75%) e nível de predação moderada (39% das sementes). Adultos emergem da semente, cujo embrião foi predado e posteriormente se alimentam das flores (PEREIRA *et al.*, 2014; RAMOS *et al.*, 2001).

Outro besouro reportado como consumidor que pode causar dano à macaúba é *Cyclocephala forsteri*, o qual é um consumidor de flores e é fortemente atraído pelo odor emitido pelas inflorescências de macaúba logo após a abertura. Relata-se preocupação de que tal espécie possa se tornar praga agrícola da macaúba caso venha a ser cultivada em larga escala, tendo em vista a ampla distribuição do referido besouro e sua alta atratividade pelas flores de macaúba. Nesse caso, é reportada a possibilidade de redução da produtividade de frutos como consequência da predação essencialmente de flores femininas (MAIA *et al.*, 2020). Apesar do reportado, é necessário verificar melhor tal aspecto como predador, visto que o mesmo também é reportado como polinizador (SCARIOT *et al.*, 1991).

De acordo com SCARIOT *et al.* (1991) os potenciais polinizadores são *Andranthobios*, *Mystrops cf. mexicana* e *Cyclocephala fosteri*. Além desses polinizadores, foram registrados mais 45 visitantes florais, dos quais alguns podem ser considerados co-polinizadores, incluindo moscas, abelhas sem ferrão e outros coleópteros (CARREÑO-BARRERA *et al.*, 2021).

Também são mencionados outros insetos que usam a macaúba como abrigo durante seu ciclo de vida. Foram registradas 11 espécies de triatomíneos. Tais insetos são potenciais vetores da doença de chagas causada pelos microrganismos flagelados *Trypanosoma* (GURGEL-GONÇALVES *et al.*, 2009; ABAD-FRANCH *et al.*, 2015; LONGA *et al.*, 2005; MOROCOIMA *et al.*, 2011; BAR *et al.*, 2001; MOROCOIMA *et al.*, 2018; RODRÍGUEZ *et al.*, 2018)

Além dos insetos já mencionados, outros artrópodes são reportados, especialmente ácaros, como é o caso de uma nova espécie de Ameroseiidae, coletada em folhas, pertencente a gênero até então desconhecido no Brasil e de biologia pouco conhecida (NARITA *et al.*, 2016). Também foi descrita a nova espécie *Aceria biornata* - Eriophyidae, coletada em botões florais e que aparentemente não causa danos à planta (NAVIA *et al.*, 2002). Além dessa espécie, foi descrita *Nostotrix acuminata* - Eriophyidae em *A. aculeata* (NAVIA *et al.*, 2003), sem maiores menções à sua biologia de interações com a macaúba. Um ácaro potencialmente preocupante para macaúba é *Raoiella indica*, originário da Índia, mas que vem sendo encontrado ao redor do globo e tem sido tratado como espécie invasora. Esses artrópodes se alimentam de tecidos das folhas causando danos às mesmas de forma que macaúba está suscetível à infestação pelos mesmos (SOUZA *et al.*, 2020).

2.5.3.3.2 Vertebrados

Macacos prego (*Cebus libidinosus*) habitantes de florestas que margeiam culturas agrícolas foram reportados consumindo macaúba 8,6%

das vezes dentre outros itens alimentares (incluindo culturas agrícolas convencionais). Nesse estudo, sugere-se que se faça um incremento de plantas com produtividade estendida como a macaúba, para minimizar o uso de culturas agrícolas por macacos prego (FREITAS *et al.*, 2008). Além disso, macacos prego foram reportados utilizando pedras para quebrar o epicarpo e eventualmente o endocarpo de macaúba, de forma que os autores levantam a questão sobre o uso de ferramentas para fins alimentares entre primatas brasileiros (WAGA *et al.*, 2006).

Psitacídeos na Bolívia (departamento de Beni ao norte do país) usam macaúba como recurso chave em um ambiente de fragmentos naturais de floresta. As doze espécies observadas usam macaúba para nidificar em cavidades onde 80% das cavidades foram em indivíduos mortos (BERKUNSKY *et al.*, 2015). Já o Papagaio da nuca amarela no noroeste da Costa Rica também prefere fazer ninho em cavidade de macaúbas mortas. Apesar da preferência, não são especializados em fazer ninhos apenas nessas plantas. Postula-se que macaúba é mais seguro para se protegerem de predadores terrestres por não possuir ramificações pendentes e pela presença de espinhos no tronco.

Mesmo considerando vantagens ecológicas, a nidificação em macaúba pode representar armadilha ecológica, pois caçadores podem cavar nos troncos de macaúba para posteriormente pegar filhotes em ninhos previamente conhecidos (DAHLIN *et al.*, 2018). Araras canindé em área urbana no Brasil central foram reportadas usando macaúba 13% das vezes como recurso alimentar. O padrão de consumo de palmeiras por psitacídeos na estação seca em áreas naturais se repete no caso reportado em área urbana: macaúba é espécie chave para psitacídeos (SANTOS *et* RAGUSANETTO, 2014).

2.5.4 Macaúba Antrópica

A macaúba tem sido reportada como uma palmeira fortemente associada ao homem ao longo de sua história nas Américas. São mais de 10.000 anos de registro arqueológico para macaúba nas Américas. Tais registros são em sua maior parte na América Central (29 localidades). O registro mais antigo é de Santarém, no Pará, a 11 mil anos atrás. Os autores sugerem dispersão humana a partir da América do Sul para a América Central, devido à idade mais antiga na América do Sul e outras idades intermediárias na América Central (MORCOTE-RÍOS et BERNAL, 2001).

No bioma amazônico, a macaúba nunca está associada a florestas maduras. No interior do Pará, é reportada em áreas próximas a habitações, em vegetações abertas (perturbadas), sendo considerada cultivada. Nesse sentido, uma localidade em Paragominas apresentou alta densidade, como eventual artefato humano: algo corroborado por narrativas Mundurukú. Já na área Murumuro, a macaúba normalmente está associada à terra preta de índio. Também faz parte da narrativa de lendas como no caso do povo Wará. Foi observado que a palmeira é poupada na abertura de sítios para quintais ou mesmo pastagens no Mato Grosso. Nesse caso, o gado se alimenta dos frutos, servindo como dispersor de grande porte. Em feiras amazônicas, há venda de frutos e óleo extraído de amêndoas para preparo de sopas (SMITH, 2015).

Segundo CARDOSO et al., (2017), no contexto da importância da macaúba para os humanos, as pesquisas com macaúba como oleaginosa de grande promessa iniciaram-se na década de 1980, encabeçadas pelo CETEC-MG. Sua primeira menção na literatura é da década de 1940, versando sobre aspectos botânicos e usos. Um tópico importante são as atividades extrativistas em populações grandes, que demonstram a viabilidade da macaúba na produção de energia e alimentos. Apresenta-se um enfoque na necessidade de seleção de genótipos adaptados a alta produtividade em diferentes condições edafoclimáticas. Os autores destacam a importância de mais estudos para *Acrocomia intumescens*, por sua natural

adaptação ao semiárido, especialmente em cenários de mudanças drásticas no clima. Almejando a implementação da macaúba como espécie de uso comercial em larga escala, enxerga-se a cadeia produtiva do óleo de palma (*Elaeis guineensis*) como um ponto inicial para a macaúba. Sendo assim, uma possível vantagem da macaúba em relação à palma, é o tempo de armazenagem do fruto até a extração, sendo superior no caso da macaúba, podendo ser estocada por até 16 dias sem passar dos 5% de acidificação. Tal característica pode ser aplicada na redução de perdas de matéria-prima para os diversos produtos extraídos de sua polpa. Ainda considerando sua cadeia produtiva, os autores destacam a importância do aprimoramento dos equipamentos de extração das partes do fruto e dos óleos. Isso, pois os equipamentos em uso são de tecnologia desenvolvidas para outras espécies e têm gerado baixos rendimentos. Outro ponto importante para o estabelecimento de sua cadeia produtiva são programas de melhoramento para geração de cultivares com uma seleção genômica ampla para acelerar resultados. Outro aspecto muito importante para a implantação da macaúba como espécie comercial é o desenvolvimento de uma cadeia de valor para superar a dificuldade de espera nos primeiros anos de implantação. Nesse caso, modelos de agrofloresta são apontados como o principal caminho, especialmente para pequenos fazendeiros (CARDOSO et al., 2017).

Nesse sentido, em um estudo com um modelo de agrofloresta usando café e macaúba em diferentes arranjos de distância entre as culturas, observou-se umidade do solo menor em áreas plantadas com café próximo à macaúba, ao passo que áreas com café não sombreado apresentaram maior temperatura do ar. O primeiro caso pode estar relacionado ao uso da água por macaubeiras e o segundo ao estabelecimento de um microclima mais ameno para o café quando consorciado com macaúba. O sombreamento foi maior em café mais próximo à macaúba, onde a radiação fotossintética ativa (PAR) foi menor. A produtividade foi maior em café mais distante de macaúba (no ano de maior produtividade), com produtividade mais de três vezes maior que café não sombreado. Ao mesmo tempo, no ano de menor produtividade, o café mais próximo da macaúba teve produtividade similar ao café em sol pleno. Sendo assim, o consorciamento de café com macaúba pode ser estratégico para mitigar efeitos das mudanças no clima que podem vir a

afetar a produção de café através da promoção de um melhor microclima para cultura do café (MOREIRA et al., 2018).

Em um artigo sobre etnoquímica que revisou quatro espécies de palmeiras, observa-se que o comércio de produtos de palmeiras é pouco representativo, exceto para dendê (*Elaeis guineensis*) e açaí (*Euterpe oleracea*). Nesse estudo, a macaúba é reconhecida por seus aspectos nutricionais e terapêuticos. Apresentam-se seus compostos bioativos de interesse industrial como carotenoides e constituintes fenólicos com alto teor de ácidos graxos. A cor amarelo-alaranjada de sua polpa se dá principalmente pela presença de betacaroteno, que corresponde a 80% dos carotenoides. A polpa também é reportada em sua ação antioxidante, podendo ser consumida crua ou processada. O óleo da amêndoa pode ser usado em cosméticos. Seu maior teor de óleo está no mesocarpo, sendo os principais: ácido oleico, ácido palmítico e ácido linoleico. A amêndoa tem principalmente ácido láurico, ácido oleico, ácido palmítico e ácido mirístico. O óleo de polpa de macaúba é mais vantajoso que o de soja, devido ao ácido linoleico (menor degradação de óleo por oxidação) (DE SOUZA et al., 2020).

Além das aplicações tradicionais convencionais com uso de frutos e sementes, há registro da produção de bebida alcoólica fermentada a partir de raspas do interior do tronco de macaúbas (ALCÁNTARA-HERNÁNDEZ et al., 2010).

2.5.5 Serviços Ecossistêmicos

A seguir apresentam-se os serviços ecossistêmicos ofertados pela macaúba que são reportados na literatura selecionada.

2.5.5.1 Adequabilidade (modelagem de nicho) e modelos climáticos

Em um estudo que realizou a modelagem de distribuição de espécies para a macaúba ao longo de sua distribuição pelo continente americano, utilizando o algoritmo MaxEnt, foi observado que as áreas com maior adequabilidade (atual) correspondem a 2,8% do total para as Américas (PLATH et al., 2016). Os autores mencionam savana como a vegetação mais adequada (42%), porém foram reducionistas ao reunir Florestas Estacionais Semideciduais no domínio do Cerrado a essa categoria. No cenário pessimista de mudanças no clima, foram previstas mudanças consideráveis em tamanho e disponibilidade de áreas. Uma grande área de distribuição potencial poderá se tornar indisponível no sudeste do Brasil e no Paraguai, ao passo que um pequeno ganho em área está previsto na Argentina. Neste estudo, está prevista a perda de 59% da área potencial em virtude de mudanças no clima, com incremento de área menos adequadas em detrimento daquelas de média adequabilidade. Estimou-se a perda de 65% de áreas adequadas no Brasil. No estudo, observou-se que áreas de savana e de cultivo tendem a ficar estáveis ou aumentar levemente até 2050 e depois diminuir a partir de 2080. Florestas poderão ser as áreas mais adequadas a partir dos anos 2080. Observou-se que áreas mais adequadas para cultivo no futuro, em cenário pessimista de mudanças no clima, se sobrepõem às áreas de alto valor para conservação. Portanto, a redução de áreas adequadas atuais poderá ser um risco para negócios com macaúba, de acordo com as previsões do estudo. A projeção de área adequada à produção de óleo de macaúba, considerando toda área adequada atual, é de até 1750 Mt (megatoneladas) de óleo, sendo que a da soja é de 7,7 Mt. Os autores se preocupam com a expansão de áreas de cultivo de macaúba sobre florestas, assim como é o caso da soja e do dendê (*Elaeis guineensis*). Os autores também discutem que as áreas adequadas para macaúba estão fora da região amazônica, o que se dá de maneira contrária ao dendê. Dessa maneira, cultivar palmeiras nativas pode tornar essa monocultura menos danosa aos ecossistemas, se comparada ao dendê, e reduzir custos na produção como no caso de aquisição de sementes e tecnologia estrangeira.

Outro estudo buscou prever a produtividade de frutos de macaúba através de inteligência artificial e estabelecer um modelo de zoneamento agroclimático (RESENDE et al., 2020). Nesse estudo, em 67% do estado de

Minas Gerais, indica-se boa confiabilidade para predição dos componentes dos frutos de macaúba usando o algoritmo Random Forest (RF). O estudo em questão vai além do proposto em FALASCA et al., (2017) por abordar as complexidades da rede de interações que existem entre as variáveis empregadas, tornando as predições mais confiáveis. Supõe-se que a produtividade de macaúba será pouco influenciada por mudanças no clima em virtude de sua plasticidade e rusticidade; e em uma visão otimista e contradizendo PLATH et al. (2016), talvez sua produtividade aumente devido à sua resiliência a altas temperaturas e déficit hídrico. Outros estudos como PIRES et al., (2013) e DIAS et al., (2018) corroboram o exposto. Mais uma vez, é abordada a vantagem da macaúba em relação ao dendê devido à sua amplitude latitudinal. Destaca-se a ausência de macaúba na Caatinga, apesar de o modelo RF prever alguma produtividade no bioma mencionado. É importante também estudar mais sobre os motivos de fatores que previnem ou impedem a ocorrência da espécie em certas localidades. Minas Gerais apresenta potencial para produção de frutos de macaúba, mas algumas regiões apresentam alto potencial para produção de certos componentes do fruto, enquanto outras têm baixo a mediano potencial. Isso pode ocorrer devido à baixa correlação entre componentes dos frutos. A área melhor predita para temperaturas é a região central de Minas Gerais, na transição entre Cerrado e Mata Atlântica, que engloba a fronteira de climas CwA/Aw (clima tropical/subtropical com inverno seco) e CwB (clima subtropical de altitude com inverno seco), apresentando média geral de temperaturas de ambos biomas. De maneira geral, as regiões central e sudeste do estado podem ser, na média, as mais promissoras para o cultivo da macaúba, com os melhores resultados para as características analisadas para os frutos.

Outro estudo que utiliza um modelo agroclimático "tradicional" estabelece áreas potenciais para o cultivo da macaúba na Argentina (FALASCA et al., 2017). Foi determinada uma parte ao norte do território argentino adequada para o cultivo de macaúba. O grau de adequabilidade nesse trecho do território varia e corresponde ao local de ocorrência natural da espécie no país. Esse trecho está associado à Mata Atlântica, o que corrobora a associação da macaúba a solos florestais, conforme mencionado em FERREIRA DA MOTTA et al. (2002).

2.5.5.2 *Captação e escoamento de água pelo solo*

"A macaúba, por suas características morfológicas, favorece a captação de água da chuva, apresentando um volume relativamente elevado de escoamento pelo tronco em plantas ainda jovens" (CORRÊA et al., 2016). Nesse caso, o fluxo de água pela estipe (tronco) pode ser maior em plantas com mais folhas. Quando comparado a florestas nativas, o fluxo de água pela estipe em plantios de macaúba revela-se superior. Nesse caso, mais de 80% do fluxo de água pela estipe pode ser explicado pela variação na precipitação bruta. Quando comparado com eucalipto e pinus, a macaúba intercepta água da chuva de maneira mais eficiente (CORRÊA et al., 2016).

Correlações entre precipitação bruta e escoamento superficial no solo podem ser positivas (ou seja, quanto mais chove, mais escorre água). Observou-se tal correlação em nível de mais de 40% em estudos com tratamentos diferentes avaliando modelos de plantio com macaúba, incluindo consorciamentos. Nesse caso, o escoamento superficial pode ocorrer a partir de 7 milímetros de precipitação. Quando comparado com vegetação florestal em estágio inicial de regeneração, ela oferece maior proteção do solo contra processos erosivos causados pelo escoamento superficial. Sendo assim, o escoamento superficial diminui com o aumento da cobertura do solo. Apesar dos tratamentos apresentarem algum escoamento superficial, a presença de macaúba tornou os eventos até cinco vezes menores que os casos sem consorciamento com macaúba. O fator declividade é crucial para intensificar o escoamento superficial, assim como o tipo de cobertura do solo. Em todo caso, a cobertura florestal nativa apresenta escoamento superficial pouco expressivo se comparado a outros tipos de cobertura, especialmente aqueles com solo sazonalmente exposto com um nível de degradação que o deixe parcialmente exposto (CORRÊA et al., 2018).

2.5.5.3 *Qualidade da pastagem e atributos químicos do solo (incluindo carbono) em pastagens consorciadas com macaúba*

A macaúba pode ser uma das espécies que permite maior passagem de luz solar quando comparada a outras espécies arbóreas isoladas em pastagens. Espécies que permitiram maior passagem de luz, como a macaúba, podem apresentar maior cobertura por braquiária (*Urochloa* spp.). A biomassa herbácea de braquiária pode apresentar melhor qualidade nutricional sob macaúba, apesar de a macaúba não ser a espécie que pode trazer mais melhorias para essa qualidade nutricional (ESQUIVEL-MIMENZA et al., 2013).

Pastagens não consorciadas podem apresentar maiores teores de alumínio, apesar de apresentarem maiores teores de fósforo e potássio. Quando comparado com macaúba não consorciada, pastagens consorciadas com macaúba e pastagens não consorciadas, o solo de vegetação nativa apresenta baixos valores de nutrientes, o que está relacionado à rápida absorção destes assim que são liberados nas camadas superficiais do solo. O carbono orgânico total é maior em vegetação nativa, seguida de pastagem consorciada com macaúba. Nesse caso, a macaúba contribui para a deposição de M.O. (matéria orgânica) no solo. O carbono microbiano pode ser maior em pastagem solteira (não consorciada), onde os autores atribuem tal resultado à abundância do sistema radicular com consequente liberação de exsudados, juntamente à ausência de distúrbios como revolvimento do solo e fogo, o que contribui para o desenvolvimento microbiano. A proporção de carbono microbiano comparado ao carbono total pode ser maior em pastagem. Apesar da menor proporção em macaúba não consorciada, tal valor é superior ao encontrado em pastagem solteira. A associação de macaúba mais pastagem pode ser considerada forma eficiente de reciclar nutrientes e M.O., contribuindo para melhorar a qualidade do solo. Vegetação nativa e consórcio podem ser importantes para manutenção de fertilidade do solo e incremento de carbono no mesmo (LEITE et al., 2013).

2.5.5.4 Emissões e sequestro de gases do efeito estufa

Fertilizantes são os maiores responsáveis pelas emissões em plantios de macaúba. Em ordem decrescente, são listadas as emissões por N, K e P. A redução do uso de fertilizantes, especialmente N, pelo uso de biofertilizantes e outras estratégias que venham a contribuir com a retenção de nutrientes no sistema solo, pode reduzir as emissões do cultivo de macaúba, tornando sua produção ainda mais sustentável. Conclui-se que a macaúba utilizada em plantações comerciais apresenta benefícios ambientais quando comparada a outras oleaginosas como girassol, mamona e o pinhão manso, por emitir menos gases do efeito estufa quando analisadas a partir de metodologia da análise do ciclo de vida de materiais (FERNÁNDEZ-COPPEL et al., 2018).

O input de energia para cultivo não muda em diferentes cenários de produtividade, visto que o protocolo de plantio não varia. Uma pequena variação pode ser observada em simulação para colheita, pois plantas mais produtivas podem demandar mais transporte e mais mão de obra. O saldo de sequestro de carbono durante 30 anos pode variar de 617 a 956 ton CO₂ eq. ha⁻¹. Tal saldo em cenários de alta produtividade pode ser superior a várias culturas energéticas convencionais e pode ser equiparável ou mesmo superior ao dendê (BARBOSA-EVARISTO et al., 2018).

Em um estudo visando quantificar a acumulação de carbono em plantio comercial de macaúba em Minas Gerais para estimar o potencial de geração de créditos de carbono, foi observada pequena variação nas medidas dendrométricas dos indivíduos avaliados. Isso permite a utilização de valores médios nas estimativas do estudo. A proporção de acumulação de biomassa acima e abaixo do solo varia ao longo do ciclo de vida da planta, sendo que até o primeiro ano a biomassa abaixo do solo é superior à biomassa acima do solo, e a partir do primeiro ano tal proporção se inverte, chegando a 41% aos nove anos de idade. A proporção de carbono sobre os outros elementos químicos em diferentes idades foi um pouco superior a 50%, o que não está muito distante do estimado pelo IPCC. Considerando-se as

amostras de diferentes idades e seus crescentes resultados ao longo do tempo de crescimento da palmeira, obteve-se o valor de aproximadamente 25 toneladas de carbono equivalente por hectare por ano em plantios de macaúba com 400 indivíduos por hectare. Tal valor, considerando um período de nove anos, é superior às emissões previstas em um período de 30 anos, o que demonstra a viabilidade ambiental do cultivo de macaúba sob o aspecto de emissões de gases do efeito estufa. No que se refere à possibilidade de geração de receitas com o mercado de carbono e considerando os resultados obtidos, estima-se a necessidade de plantio, no espaçamento já citado, de 560 hectares para que seja possível a comercialização de tais créditos. Isso corresponde a geração de 16.088 toneladas de carbono sequestrado ao ano, o que pode gerar receitas de mais de 400.000 euros, considerando o valor do crédito de carbono a 26,49 euros (MOREIRA et al., 2020).

2.6 CONCLUSÕES

A macaúba é uma planta que vem sendo bem estudada nos últimos anos ao se considerar seus aspectos biológicos. Sob o ponto de vista das populações, as correlações que sugerem uma moderada herdabilidade revelam-se úteis para a domesticação da espécie. Dessa forma, sua grande variabilidade genética é algo que se demonstra vantajoso na busca por variedades produtivas e adaptadas às diferentes demandas por produtos naturais. Além disso, o uso de mais marcadores microsatélites pode trazer maior confiabilidade aos estudos de populações com ferramentas moleculares, tanto na busca por uma melhor compreensão de sua taxonomia quanto sob o aspecto da seleção de linhagens de interesse comercial.

Algumas afirmações como a associação da macaúba a ambientes degradados em solos de baixa fertilidade, além da polinização pelo vento, mostram-se pouco sustentáveis, onde demonstra-se uma exigência por solos de boa qualidade com um importante papel de polinizadores quando se tem

por objetivo maximizar a produtividade. Chama bastante atenção o aspecto da resiliência da planta a variações do ambiente luminoso, déficits hídricos, aumento de teores de CO₂ atmosférico e resistência a queimadas, o que reforça o caráter de rusticidade da planta e eventual adaptabilidade às mudanças ambientais que porventura se consolidem com as mudanças no clima.

São reportados um razoável número de organismos associados direta ou indiretamente à macaúba, o que sugere seu importante papel para o fornecimento de recursos ao ecossistema natural a que esteja associada. No entanto, tais estudos correlacionando organismos autotróficos e heterotróficos devem avançar tanto ao se considerar a importância da macaúba na manutenção de espécies a ela associadas, incluindo epífitas e consumidores, quanto no sentido de se compreenderem melhor aspectos de seu manejo enquanto cultura agrícola em média e larga escala.

Considerando sua grande afinidade com a humanidade desde a pré-história até os dias atuais, faz todo sentido a sua valorização como espécie de grande potencial agrônômico para produção de energia e alimentos em sinergia. Dessa maneira, sua adaptabilidade a mudanças no clima, seu grande espectro de ocorrência latitudinal, manejo relativamente simples, possibilidade de consorciamento com outras culturas agrícolas e a alta qualidade de seus produtos naturais reforçam seu valor enquanto espécie em domesticação. Apesar de algumas abordagens pessimistas quanto a negócios agrícolas com macaúba em larga escala quando se abordam previsões sobre mudanças no clima, o contrário também pode ser dito, o que acaba sendo reforçado pela rusticidade e adaptabilidade da espécie, principalmente quanto a seus aspectos ecofisiológicos. Isso a torna uma excelente aposta na mitigação dos efeitos das mudanças no clima, tanto pela previsão de manutenção de sua produtividade durante tais eventos quanto pela sua grande capacidade de sequestro de carbono, mesmo em cenários de cultivo convencional.

2.7 REFERÊNCIAS

ABAD-FRANCH, Fernando *et al.* On palms, bugs, and Chagas disease in the Americas. **Acta Tropica** v. 151, n. 1, p. 126–141 , nov. 2015.

ABREU, Aluana Gonçalves *et al.* The genetic structure and mating system of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). **Genetics and Molecular Biology** v. 35, n. 1, p. 119–121 , 2012.

ALCÁNTARA-HERNÁNDEZ, R J *et al.* The bacterial community in “taberna” a traditional beverage of Southern Mexico. **Letters in Applied Microbiology** v. 51, n. 5, p. 558–563 , 2010.

ALFARO-SOLÍS, Jose David *et al.* *Acrocomia aculeata* fruits from three regions in Costa Rica: an assessment of biometric parameters, oil content and oil fatty acid composition to evaluate industrial potential. **Agroforestry Systems** v. 94, n. 5, p. 1913–1927 , 2020.

ALVES, Joyce de Almeida; DE CARVALHO, Douglas Antônio. The arecaceae family (palm trees) in the lavras county, MG. **Cerne** v. 16, n. 2, p. 163–170 , jun. 2010.

ARAÚJO, Maircon Rasley Gonçalves *et al.* Fine-scale spatial genetic structure and gene flow in *Acrocomia aculeata* (Arecaceae): Analysis in an overlapping generation. **Biochemical Systematics and Ecology** v. 71, p. 147–154 , 2017.

BAR, María Esther; WISNIVESKY-COLLI, Cristina. *Triatoma sordida* Stål 1859 (Hemiptera, Reduviidae: Triatominae) in Palms of Northeastern Argentina. **Memorias do Instituto Oswaldo Cruz** v. 96, n. 7, p. 895–899 , 2001.

BARBERENA, Felipe Fajardo Villela Antolin *et al.* What are the species of phorophytes of *Vanilla palmarum* (Orchidaceae) in Brazil: An assessment of emblematic specificity with palm tree species. **Rodriguesia** v. 70 , 2019.

BARBOSA-EVARISTO, Anderson *et al.* Simulation of macauba palm cultivation: an energy-balance and greenhouse gas emissions analysis. **Carbon Management** v. 9, n. 3, p. 243–254 , 2018.

BASKIN, Jerry M.; BASKIN, Carol C. What kind of seed dormancy might palms have? **Seed Science Research** v. 24, n. 1, p. 17–22 , mar. 2014.

BAZZO, Bárbara Regina *et al.* Development of novel EST-SSR markers in the macaúba palm (*Acrocomia aculeata*) using transcriptome sequencing and cross-species transferability in Arecaceae species. **BMC Plant Biology** v. 18, n. 1, p. 276 , 2018.

BERKUNSKY, Igor *et al.* Évaluation De L'Utilisation D'Îles Forestières Par Des Espèces De Perroquets Dans Une Savane Néotropicale. **Avian Conservation and Ecology** v. 10, n. 1 , jun. 2015.

BERTON, Luiz Henrique Chorfi *et al.* Seed germination and estimates of genetic parameters of promising macaw palm (*Acrocomia aculeata*) progenies for biofuel production. **Industrial Crops and Products** v. 51, p. 258–266 , nov. 2013.

BICALHO, Elisa Monteze *et al.* Do the structures of macaw palm fruit protect seeds in a fire-prone environment? **Acta Botanica Brasilica** v. 30, n. 4, p. 540–548 , 2016.

CARDOSO, Alexandre *et al.* Opportunities and challenges for sustainable production of *A. aculeata* through agroforestry systems. **Industrial Crops and Products** v. 107, p. 573–580 , 2017.

CARREÑO-BARRERA, Javier *et al.* Co-pollination, constancy, and efficiency over time: small beetles and the reproductive success of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae) in the Colombian Orinoquia. **Botany Letters** v. 168, n. 3, p. 395–407, 2021.

CICONINI, Gabrielly *et al.* Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Industrial Crops and Products** v. 45, p. 208–214 , 2013.

COELHO, Natália Helena Pessa *et al.* Understanding genetic diversity, spatial genetic structure, and mating system through microsatellite markers for the conservation and sustainable use of *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart. **Conservation Genetics** v. 19, n. 4, p. 879–891 , 2018.

CORRÊA, João Batista Lúcio *et al.* Influência do número de folhas da planta de macaúba *Acrocomia aculeata* (Jacq.) lodd. ex mart. na correlação entre escoamento pelo tronco e a precipitação em aberto. **Revista Arvore** v. 40, n. 3, p. 387–393 , 2016.

CORRÊA, João Batista Lúcio *et al.* Surface runoff of rainfall in an experimental plantation of macaúba palm (*Acrocomia aculeata*) under different forms of management. **Revista Arvore** cited v. 42, n. 1 , 2018.

COSER, S. M. *et al.* Breeding of *Acrocomia aculeata* using genetic diversity parameters and correlations to select accessions based on vegetative, phenological, and reproductive characteristics. **Genetics and Molecular Research** v. 15, n. 4 , out. 2016.

COSTA, Annanda Mendes *et al.* Genetic parameters and selection of macaw palm (*Acrocomia aculeata*) accessions: An alternative crop for biofuels. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** v. 18, n. 3, p. 259–266 , 2018.

- DA CONCEIÇÃO, Léo Duc Haa Carson Schwartzhaupt *et al.* Genetic diversity of macauba from natural populations of Brazil. **BMC Research Notes** v. 8, n. 1 , 2015.
- DAHLIN, Christine R. *et al.* Long-term monitoring of Yellow-naped Amazons (*Amazona auropalliata*) in Costa Rica: breeding biology, duetting, and the negative impact of poaching. **Journal of Field Ornithology** v. 89, n. 1, p. 1–10 , mar. 2018.
- DE ARAÚJO, Vitor Carvalho Ribeiro *et al.* Distribution and attack of pineapple mealybug to macauba palm *Acrocomia aculeata*. **International Journal of Tropical Insect Science** v. 41, n. 4, p. 2765-2773, 2021..
- DE LIMA, Natácia Evangelista *et al.* A review of the palm genus *Acrocomia*: Neotropical green gold. **Organisms Diversity and Evolution** v. 18, n. 2, p. 151–161 , jun. 2018.
- DE LIMA, Natácia Evangelista; MEEROW, Alan William; MANFRIN, Maura Helena. Genetic structure of two *Acrocomia* ecotypes (*Arecaceae*) across Brazilian savannas and seasonally dry forests. **Tree Genetics and Genomes** v. 16, n. 4 , 2020.
- DE SÁ, Silvia Ferreira *et al.* Genetic diversity via REML-BLUP of ex situ conserved macauba [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.] ecotypes. **Genetic Resources and Crop Evolution** v. 68, n. 8, p.3193-3204 , 2021
- DE SOUZA, Florisvaldo Gama *et al.* Brazilian fruits of *Arecaceae* family: An overview of some representatives with promising food, therapeutic and industrial applications. **Food Research International** v. 138, n. A , 2020.
- DIAS, Adriel N. *et al.* Acclimation responses of macaw palm seedlings to contrasting light environments. **Scientific Reports** v. 8, n. 1 , 2018.

DINIZ, Lídia Tarchetti *et al.* Alterações microbianas e químicas de um gleissolo sob macaubeiras nativas em função da variação sazonal e espacial.

Bioscience Journal v. 30, n. 3, p. 750–762 , 2014.

DOMICIANO, Gisele Pereira *et al.* Parâmetros genéticos e diversidade em progênies de macaúba com base em características morfológicas e

fisiológicas. **Ciencia Rural** v. 45, n. 9, p. 1599–1605 , 2015.

DOS REIS, E F *et al.* Characteristics of 137 macaw palm (*Acrocomia aculeata*) fruit accessions from Goiás, Brazil. **Comunicata Scientiae** cited v. 10, n. 1, p. 117–124 , 2019.

ESQUIVEL-MIMENZA, H. *et al.* Standing herbage biomass under different tree species dispersed in pastures of cattle farms. **Tropical and Subtropical Agroecosystems** v. 16, n. 2, p. 277–288 , 2013.

ESQUIVEL-MIMENZA, Humberto *et al.* Dispersed trees in pasturelands of cattle farms in a tropical dry ecosystem. **Tropical and Subtropical Agroecosystems** v. 14, n. 3, p. 933–941 , 2011.

FALASCA, Sílvia; ULBERICH, Ana; PITTA-ALVAREZ, Sandra. Development of agroclimatic zoning model to delimit the potential growing areas for macaw palm (*Acrocomia aculeata*). **Theoretical and Applied Climatology** v. 129, n. 3–4, p. 1321–1333 , 2017.

FERNÁNDEZ-COPPEL, Ignacio A *et al.* Life cycle analysis of macauba palm cultivation: A promising crop for biofuel production. **Industrial Crops and Products** v. 125, p. 556–566 , 2018.

FERREIRA DA MOTTA, Paulo Emílio *et al.* Occurrence of macaúba in Minas Gerais, Brazil: Relationship with climatic, pedological and vegetation attributes. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira** v. 37, n. 7, p. 1023–1031 , jul. 2002.

FREITAS, Carlos Henrique De *et al.* Agricultural crops in the diet of bearded capuchin monkeys, *Cebus libidinosus* Spix (Primates: Cebidae), in forest fragments in southeast Brazil. **Revista Brasileira de Zoologia** v. 25, n. 1, p. 32–39 , mar. 2008.

GÖLDEL, Bastian *et al.* Impacts of large herbivores on spinescence and abundance of palms in the Pantanal, Brazil. **Botanical Journal of the Linnean Society** cited v. 182, n. 2, p. 465–479 , 2016.

GUATIMOSIM, Eduardo; PINTO, Henrique Jorge; BARRETO, Robert Weingart. *Passalora acrocomiae* sp. nov. and *Exosporium acrocomiae* from the palm *Acrocomia aculeata* in Puerto Rico. **Mycotaxon** v. 122, n. 1, p. 61–67 , 2012.

GURGEL-GONÇALVES, Rodrigo; CUBA, César Augusto Cuba. Predicting the potential geographical distribution of *Rhodnius neglectus* (Hemiptera, Reduviidae) based on ecological niche modeling. **Journal of Medical Entomology** v. 46, n. 4, p. 952–960 , jul. 2009.

LANES, Éder C.M. *et al.* Molecular characterization and population structure of the Macaw Palm, *Acrocomia aculeata* (Arecaceae), Ex Situ Germplasm collection using microsatellites markers. **Journal of Heredity** v. 106, n. 1, p. 102–112 , 2015.

LEITE, Luiz F.C. *et al.* Chemical quality of soil and dynamics of carbon under monoculture and intercropping of acrocomia palm and pasture. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 17, n. 12, p. 1257–1263 , 2013.

LONGA, ANA; SCORZA, JOSÉ VICENTE. *Acrocomia aculeata* (Palmae), hábitat silvestre de *Rhodnius robustus* en el Estado Trujillo, Venezuela. **Parasitología latinoamericana** cited v. 60, n. 1–2, p. 17–24 , jun. 2005.

MAIA, Artur Campos Dália *et al.* Chemical ecology of *Cyclocephala forsteri* (Melolonthidae), a threat to macauba oil palm cultivars (*Acrocomia aculeata*, Arecaceae). **Journal of Applied Entomology** v. 144, n. 1–2, p. 33–40 , 12 fev. 2020.

MANFIO, Candida Elisa *et al.* Repeatability in biometric characteristics of macaw palm fruit. **Ciencia Rural** v. 41, n. 1, p. 70–76 , jan. 2011.

MARCATO, A.C.; PIRANI, J.R. Flora da Serra do Cipó, Minas Gerais, Palmae (Arecaceae). **Boletim de Botânica** v. 19, p. 45 , 27 jun. 2001.

MARCATO, A.C.; PIRANI, J.R. Flora de Grão-Mogol, Minas Gerais: Palmae (Arecaceae). **Boletim de Botânica** v. 24, n. 1, p. 1 , 1 jun. 2006.

MAURIN, Jean-Christophe; GUIRAUD, René. Basement control in the development of the early cretaceous West and Central African rift system. **Tectonophysics** v. 228, n. 1–2, p. 81–95 , dez. 1993.

MAZZOTTINI-DOS-SANTOS, Hellen C. *et al.* Floral structure in *Acrocomia aculeata* (Arecaceae): evolutionary and ecological aspects. **Plant Systematics and Evolution** v. 301, n. 5, p. 1425–1440 , 2015.

MENGISTU, Fekadu G.; MOTOIKE, Sérgio Y.; CRUZ, Cosme D. Molecular characterization and genetic diversity of the macaw palm *Ex situ* germplasm collection revealed by microsatellite markers. **Diversity** v. 8, n. 4, p. 20 , 2016.

MONTOYA, Sebastián Giraldo *et al.* Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta** v. 244, n. 4, p. 927–938 , 2016.

MORCOTE-RIOS, G *et al.* Remains of palms (Palmae) at archaeological sites in the New World: A review. **BOTANICAL REVIEW** v. 67, n. 3, p. 309–350 , 2001.

MOREIRA, S L S *et al.* Root distribution of cultivated macauba trees.

Industrial Crops and Products v. 137, p. 646–651 , 2019.

MOREIRA, Sandro L.S. *et al.* Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. **Agricultural and Forest Meteorology** v. 256–257, p. 379–390 , jun. 2018.

MOREIRA, Sandro Lucio Silva *et al.* Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production** v. 265 , 2020.

MOROICOIMA, Antonio *et al.* Triatominae in palm trees and their natural infection by trypanosoma cruzi in regions of eastern venezuela. **Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica** cited v. 35, n. 4, p. 563–572 , 2018.

MOROICOIMA, Antonio *et al.* Simpatría de triatominos (Reduviidae) y escorpiones (Buthidae) en Cocos nucifera y Acrocomia aculeata (Aracaceae) de Anzoátegui, Venezuela. **Boletín de Malariología y Salud Ambiental** cited By 2, v. 51, n. 2, p. 187–198 , 2011.

MOTA, Clenilso Sehnen; CANO, Marco Antonio Oliva. Respostas fotossintéticas e acúmulo de massa em plantas jovens de macaúba submetida ao déficit hídrico cíclico. **Revista Caatinga** v. 29, n. 4, p. 850–858 , 2016.

NARITA, João Paulo Z.; DE MORAES, Gilberto J. A new species of Epicriopsis Berlese (Acari: Mesostigmata: Ameroseiidae) from Brazil, with a key to the world species of the genus. **Zootaxa** v. 4114, n. 4, p. 477–484 , 25 maio 2016.

NAVIA, D.; FLECHTMANN, C. H.W. Mites (Acari) of the genus Notostrix Keifer (Eriophyidae): New records, description of six new species and key to the world species. **Acarologia** v. 43, n. 3, p. 271–289 , 2003.

NAVIA, Denise; FLECHTMANN, Carlos H.W. Mite (Arthropoda: Acari) Associates of palms (Arecaceae) in Brazil: VI. New genera and new species of Eriophyidae and Phytoptidae (Prostigmata: Eriophyoidea). **International Journal of Acarology** v. 28, n. 2, p. 121–146 , jun. 2002.

OLIVEIRA, D. A. *et al.* Genetic diversity in populations of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae) in the northern region of Minas Gerais, Brazil. **Genetics and molecular research : GMR** v. 11, n. 1, p. 531–538 , 2012.

OLIVEIRA, Deborah *et al.* Ecophysiological leaf traits of native and exotic palm tree species under semi-arid conditions. **Bragantia** v. 75, n. 2, p. 128–134 ,

PAGE, Matthew J *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ** p. n71 , 29 mar. 2021.

PEREIRA, Anielle C.F. *et al.* Ecological interactions shape the dynamics of seed predation in *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). **PLoS ONE** v. 9, n. 5 , 2014.

PIRES, Thiago Pereira *et al.* Ecophysiological traits of the macaw palm: A contribution towards the domestication of a novel oil crop. **Industrial Crops and Products** v. 44, p. 200–210 , 2013.

PLATH, Mirco *et al.* A novel bioenergy feedstock in Latin America? Cultivation potential of *Acrocomia aculeata* under current and future climate conditions. **Biomass and Bioenergy** v. 91, p. 186–195 , 2016.

PORTELA, Renan Marcelo *et al.* Using a coalescent approach to assess gene flow and effective population size of *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart. in the Brazilian Atlantic Forest. **Tree Genetics and Genomes** v. 16, n. 2 , mar. 2020.

PUKER, Anderson *et al.* Phytophagous species of Scarabaeidae (Insecta: Coleoptera) associated with the root system of *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Loddi. ex Mart. (Arecaceae). **Biota Neotropica** v. 9, n. 3, p. 105–109 , 2009.

QUIGLEY, D. T.G. *et al.* Prickly Palm *Acrocomia* spp. (Arecaceae) endocarps: first records from Irish waters and a review of NW European records. **New Journal of Botany** v. 7, n. 1, p. 51–56 , 2017.

RAMOS, F. A. *et al.* Oviposition and predation by *Speciomerus revoili* (coleoptera, bruchidae) on seeds of *Acrocomia aculeata* (arecaceae) in Brasília, DF, Brazil. **Brazilian Journal of Biology** v. 61, n. 3, p. 449–454 , ago. 2001.

RESENDE, Rafael T. *et al.* Data-based agroecological zoning of *Acrocomia aculeata*: GIS modeling and ecophysiological aspects into a Brazilian representative occurrence area. **Industrial Crops and Products** v. 154 , 2020. ROCA, M M *et al.* First Report of a 16SrIV Group Phytoplasma Associated with Declining Coyol Palms in Honduras. **Plant Disease** v. 90, n. 4, p. 526–526 , abr. 2006.

RODRIGUES-JUNIOR, A. G. *et al.* Temperature effects on *Acrocomia aculeata* seeds provide insights into overcoming dormancy in neotropical savanna palms. **Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants** v. 223, p. 30–37 , 2016.

RODRÍGUEZ, Indra G. *et al.* Trypanosoma cruzi Infection in *Rhodnius pallescens* (Heteroptera: Reduviidae) Infesting Coyol Palms in the Dry Arch of Panamá. **Journal of medical entomology** v. 55, n. 3, p. 691–700 , maio 2018.

ROSA, Bruno Luan; SOUZA, João Paulo; PEREIRA, Eduardo Gusmão. Increased atmospheric co2 changes the photosynthetic responses of *acrocomia aculeata* (Arecaceae) to drought. **Acta Botanica Brasilica** v. 33, n. 3, p. 486–497 , 2019.

RUFINO, Luana Marta de Almeida *et al.* Efeitos da inclusão de torta de macaúba sobre a população de protozoários ruminais de caprinos. **Revista Brasileira de Zootecnia** v. 40, n. 4, p. 899–903 , abr. 2011.

SANTIAGO-URBINA, Jorge Alejandro; ARIAS-GARCÍA, José Armando; RUIZ-TERÁN, Francisco. Yeast species associated with spontaneous fermentation of taberna, a traditional palm wine from the southeast of Mexico. **Annals of Microbiology** v. 65, n. 1, p. 287–296 , mar. 2015.

SANTOS, A. A.; RAGUSA-NETTO, J. Plantas alimentares exploradas pela Arara Canindé (*Ara ararauna*, Linnaeus 1758) em uma área urbana do Brasil Central. **Brazilian Journal of Biology** v. 74, n. 2, p. 429–437 , 2014.

SANTOS, Antonio Carlos Ramos Dos *et al.* Effects of macauba cake on profile of rumen protozoa of lambs. **Revista Brasileira de Zootecnia** v. 46, n. 3, p. 251–256 , mar. 2017.

SCARIOT, Aldicir O.; LLERAS, Eduardo; HAY, John D. Reproductive Biology of the Palm *Acrocomia aculeata* in Central Brazil. **Biotropica** v. 23, n. 1, p. 12 , 1991.

SCARIOT, Aldicir; LLERAS, Eduardo; HAY, John D. Flowering and Fruiting Phenologies of the Palm *Acrocomia aculeata*: Patterns and Consequences. **Biotropica** v. 27, n. 2, p. 168 , 1995.

SILVA, Luiz Cláudio Costa *et al.* Genetic Diversity and Structure of Macaw Palm: Implications for Genetic Variability Sampling. **Revista Árvore** v. 41, n. 5 , 2018.

SIMIQUELI, Guilherme Ferreira *et al.* Inbreeding depression as a cause of fruit abortion in structured populations of macaw palm (*Acrocomia aculeata*): Implications for breeding programs. **Industrial Crops and Products** v. 112, p. 652–659 , 2018.

SMITH, Nigel. *Acrocomia aculeata*. **Geobotany Studies**. [S.l.]: Springer, 2015. p. 9–15. SOARES, Kelen Pureza *et al.* Palms (Arecaceae) from Rio Grande do Sul, Brazil. **Rodriguesia** cited By 24, v. 65, n. 1, p. 113–139 , 2014.

SOUZA, I. V.; LYRA-LEMOS, R. P.; GUZZO, E. C. Potential of native palm species in Northeast Brazil as hosts for the invasive mite *Raoiella indica* (Acari: Tenuipalpidae). **Experimental and Applied Acarology** v. 80, n. 4, p. 509–520 , 2020.

VIANNA, S. A. *et al.* Phenotypical characterization of *acrocomia aculeata* fruits in natural populations in the pantanal region, mato grosso do sul, brazil 1st International Symposium on Genetic Resources of Bamboos and Palms / 3rd International Symposium on Ornamental Palms, Campinas, BRAZIL, NOV 21-25, 2010. *Acta Horticulturae*, 2013, 2013. p.169–172.

VILLANUEVA, Cristóbal *et al.* Disponibilidad de *Brachiaria brizantha* en potreros con diferentes niveles de cobertura arbórea en el trópico subhúmedo de Costa Rica. **Zootecnia Tropical** cited By 5, v. 26, n. 3, p. 293–296 , 2008.

WAGA, I. C. *et al.* Spontaneous tool use by wild capuchin monkeys (*Cebus libidinosus*) in the Cerrado. **Folia Primatologica** v. 77, n. 5, p. 337–344 , 2006.

3 CAPÍTULO 2 - ESTOQUE DE CARBONO DE UM PLANTIO COMERCIAL DE MACAÚBA (*ACROCOMIA ACULEATA*) EM MINAS GERAIS, BRASIL

3.1 RESUMO

Muitas propostas têm sido apresentadas para mitigar ou mesmo reduzir os efeitos das mudanças no clima em curso. Nesse contexto, o cultivo de macaúba (*Acrocomia aculeata*) tem se mostrado uma possibilidade notável. Foram aplicadas técnicas amostrais do inventário florestal para avaliar o estoque de carbono de plantios de macaúba, utilizando uma equação alométrica adequada. Este estudo busca estimar a quantidade de carbono de uma plantação comercial experimental de macaúba na Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil, a partir de amostragem e utilização de uma equação alométrica adequada para a espécie, evidenciando o serviço ecossistêmico de regulação da qualidade do ar a partir do sequestro de carbono. A área de estudos está localizada no município de Olaria, Minas Gerais, Brasil. A Fazenda Serra Negra é uma das propriedades rurais pioneiras no plantio comercial de macaúba. Conta atualmente com pouco mais de 24 hectares de plantio consolidado de macaúba consorciada com pastagem. As parcelas foram instaladas com o auxílio de trenas, onde os vértices foram delimitados com estacas de bambu, com uma de suas extremidades pintadas em vermelho. Todos os indivíduos de macaúba com tamanho mínimo da estipe mensurável a altura do peito foram plaqueteados e mensurados. Foi utilizada uma equação alométrica adequada para macaúba. Foram registrados 295 indivíduos de macaúba. O número médio de indivíduos por parcela foi 8,9. O DAP médio foi 41,39 cm. A altura total média foi 7,61 m. O erro do inventário foi de 23,96%. A população apresentou 1.778,34 toneladas de carbono equivalente, com limite inferior e superior de 1.352,25 e 2204,43 toneladas de carbono equivalente respectivamente. O

quantitativo de carbono nesse estudo equipara-se ao de populações naturais de macaúba. A macaúba superou outras espécies utilizadas em sistemas agroflorestais em capacidade de fixação de carbono. A utilização de amostragem em conjunto com uma equação alométrica adequada mostra-se útil na avaliação de estoque de carbono em plantios comerciais de macaúba.

Palavras-chave: macaúba; inventário florestal; sequestro de carbono; estoque de carbono.

3.2 ABSTRACT

Many proposals have been put forward to mitigate or even reduce the effects of ongoing climate change. In this context, the cultivation of macauba (*Acrocomia aculeata*) has proved to be a notable possibility. Forest inventory sampling techniques were employed to assess the carbon stock of macauba plantations, utilizing a suitable allometric equation. "This study aims to estimate the carbon content in an experimental commercial macauba plantation in the Zona da Mata of Minas Gerais, Brazil. The estimation is based on sampling and the application of a species-specific allometric equation, emphasizing the ecosystem service of regulating air quality through carbon sequestration. The study area is located in the municipality of Olaria, Minas Gerais, Brazil. Fazenda Serra Negra is one of the pioneering rural properties in the commercial planting of macauba. It currently has just over 24 hectares of consolidated macauba plantations combined with pasture. The plots were installed with the aid of tape measures, where the vertices were delimited with bamboo stakes with one end painted red. All the macauba trees with a minimum stipe size measurable at breast height were tagged and measured. The appropriate allometric equation for macauba was used. A total of 295 individuals of macauba were recorded. The average number of individuals per plot was 8.9. The average DBH was 41.39 cm. The average total height was 7.61 m. The margin of error in the inventory was 23.96%. The population had 1,778.34 tons of carbon equivalent, with lower and upper limits of 1,352.25 and 2,204.43 tons of carbon equivalent respectively. The carbon quantity found in this study is comparable to that of natural macauba populations. Macauba exceeded other species commonly utilized in agroforestry systems in its carbon sequestration capacity. The combination of sampling techniques with a suitable allometric equation proves to be invaluable in evaluating the carbon stock in commercial macauba plantations.

Keywords: macaúba; forest inventory; carbon sequestration; carbon stock.

3.3 INTRODUÇÃO

Muitas propostas têm sido apresentadas para mitigar ou mesmo reduzir os efeitos das mudanças no clima em curso. Nesse contexto, o cultivo de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart. - Arecaceae) tem se mostrado uma possibilidade notável. Suas plantações podem atingir altos níveis de produtividade de óleo por hectare em cultivos consorciados com diversas culturas agrícolas, incluindo pastagens (COELHO et al., 2019). Arranjos produtivos como o proposto para macaúba podem ser grandes protagonistas na transição energética para uma economia descarbonizada. Através de tecnologias disponíveis de refino de seu óleo, é possível substituir completamente o uso de combustíveis fósseis por biocombustíveis sem alterar a motorização da frota de veículos e maquinário em geral em nível mundial (NEULING et KALTSCHMITT, 2018). Adicionalmente, tal cadeia produtiva rompe o paradigma da competição de áreas agrícolas para produção de energia e alimentos (FERRARI & AZEVEDO FILHO, 2012; NEULING & KALTSCHMITT, 2018). Além da possibilidade de contribuir efetivamente na transição energética, tem sido demonstrado o alto potencial de sequestro de carbono através do cultivo da macaúba. Mesmo considerando emissões decorrentes do uso de insumos oriundos de fontes não renováveis, tem-se um balanço positivo de carbono acumulado no referido sistema agrícola (FERNÁNDEZ-COPPEL et al., 2018; BARBOSA-EVARISTO et al., 2018; MOREIRA et al., 2020).

A aplicação de técnicas amostrais do inventário florestal para avaliar o estoque de carbono de plantios de macaúba utilizando uma equação alométrica adequada à estimativa de carbono de macaubeiras é algo inédito. Tal procedimento pode ser útil no desenvolvimento de projetos com créditos de carbono, considerando desde sua viabilidade até sua certificação.

Este estudo busca estimar a quantidade de carbono de uma plantação comercial experimental de macaúba na Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil, a partir de amostragem e utilização de uma equação alométrica adequada

para a espécie, evidenciando o serviço ecossistêmico de regulação da qualidade do ar a partir do sequestro de carbono.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

Apresentam-se a seguir os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento desse estudo.

3.4.1 Área de estudos e amostragem

A área de estudos está localizada no município de Olaria, Minas Gerais, Brasil (UTM 23K 606555, 7573435). A Fazenda Serra Negra, antiga Fazenda Cachoeirinha, é uma das propriedades rurais pioneiras no plantio comercial de macaúba. Conta atualmente com pouco mais de 24 hectares de plantio consolidado de macaúba consorciada à pastagem, que teve seu tratos culturais interrompidos um ano após a implantação (PIMENTEL, 2020 comunicação pessoal). A cobertura vegetal original é Floresta Estacional Semidecidual. A Fazenda Serra Negra possui 1118,3 hectares, dos quais 54% são cobertos por floresta nativa.

Após a delimitação das áreas com macaúba já estabelecidas, foi realizado o quadriculamento de cada uma dessas áreas. Isso resultou em 585 possíveis parcelas com 400 m². Foi realizado um sorteio no ambiente R (R CORE TEAM, 2022) utilizando o argumento “sample” sem reposição a partir de um conjunto de 585 números inteiros iniciados em 1.

As parcelas foram instaladas com o auxílio de trenas, onde os vértices foram delimitados com estacas de bambu com uma de suas extremidades pintadas em vermelho. Todos os indivíduos de macaúba com tamanho mínimo da estipe mensurável à altura do peito foram plaqueteados com código individual. Foi feita remoção de folhas mortas à altura do peito e da

cabeça para facilitar a mensuração e evitar acidentes durante a coleta de dados. Os indivíduos tiveram suas medidas de circunferência à altura do peito (CAP - 1,3 m a partir do solo), altura total, altura de primeira folha viva e diâmetro da copa obtidos em campo. Para fins de cálculo, o CAP foi transformado em DAP (diâmetro à altura do peito).

3.4.2 Equação alométrica, cálculo de carbono equivalente e estatística utilizada

Foi utilizada a equação alométrica desenvolvida por MOREIRA (2019) ($y = 0,6584424001704x^{2,343459}$), em que “y” é o peso do carbono e “x” é a altura total de cada indivíduo de macaúba. A utilização dessa equação única para estimar carbono de macaúbas pode ser realizada através de qualquer um dos parâmetros obtidos em campo. Porém, o mais recomendável é a utilização da altura total, a qual foi utilizada. Para o cálculo de carbono equivalente, utilizou-se a equação $CO_{2eq} = Cst(44/12)*GWP$, onde Cst corresponde ao estoque de carbono e GWP corresponde ao potencial de aquecimento global do elemento, que no caso do carbono é igual a 1 (MOREIRA et al., 2020).

Após o cálculo da estimativa de carbono para cada indivíduo obtido pela equação alométrica selecionada, obteve-se o total de carbono para cada parcela. A partir daí, calculou-se a média, o desvio padrão, a variância e o coeficiente de variação de cada parcela amostrada. Aplicou-se o teste t de Student para verificar o erro amostral a 90% de nível de confiança.

3.5 RESULTADOS

Foram registrados 295 indivíduos de macaúba. O número médio de indivíduos por parcela foi 8,9, variando entre 2 e 15. O DAP médio foi 41,39 cm (SD \pm 8,90 cm), variando entre 22,28 e 61,43 cm. A altura total média foi 7,61 m (SD \pm 2,41 m), variando entre 2,85 e 13,60 m (Tabela 2).

Não foram observados valores atípicos para DAP e altura total. O desvio padrão oscilou em 21,5% e 31,7%, respectivamente. Quando submetidas à correlação linear simples, DAP e altura total não se correlacionaram ($R^2 = 0,001$, dados não apresentados). Parcelas com 9 a 15 indivíduos corresponderam a 63% da amostragem. Tais parcelas foram responsáveis por 90,7% do carbono amostrado. Quando submetidos à correlação linear simples, número de indivíduos por parcela e altura total apresentaram alguma correlação (R^2 de 0,421, dados não apresentados).

A Tabela 3 resume a estatística do inventário florestal baseado no carbono estimado pela equação de MOREIRA (2019). A área total amostrada foi de 24,4 ha. Foram mensuradas 33 parcelas, somando 1,32 ha (5% da área total). O peso médio de carbono por parcela foi de 795,08 kg (SD \pm 664,27 kg), resultando em um coeficiente de variação de 83,55%. O erro do inventário foi de 23,96%. Tal resultado está relacionado à grande heterogeneidade das unidades amostrais, representado pelo alto coeficiente de variação. Considerando o erro do inventário, o peso de carbono por parcela apresentou limite inferior e superior de 604,58 e 985,59 kg, respectivamente.

A média de carbono por hectare foi de 19.877,11 kg, com limite inferior e superior de 15.114,58 e 24.639,64 kg, respectivamente. O estoque de carbono para a população na totalidade foi de 485.001,52 kg, com limite inferior e superior de 368.795,69 e 601.207,33 kg, respectivamente.

A população apresentou 1.778,34 toneladas de carbono equivalente, com limite inferior e superior de 1.352,25 e 2204,43 toneladas de carbono equivalente, respectivamente. Considerando o período de 12 anos do plantio,

tem-se o valor de 148,19 créditos de carbono anuais, com limite inferior e superior de 112,69 e 183,70 créditos de carbono anuais, respectivamente.

Tabela 2 - Número de indivíduos (N), DAP médio (cm), altura total média (m) e carbono (kg) por parcela

Parcela	Indivíduos(N)	DAP médio(cm)	Altura total média(m)	Carbono (kg)
PM01	7	45.53	8.02	714.86
PM02	14	27.15	7.98	1317.14
PM03	11	42.1	7.15	833.57
PM04	2	43.77	4.9	54.9
PM05	12	44.83	5.52	456.34
PM06	4	47.59	4.06	80.49
PM07	12	48.94	5.78	497.94
PM08	3	44.67	5.24	106.15
PM09	12	47.22	9.15	1500
PM10	5	49.12	5.32	188.55
PM11	9	45.92	7.29	710.93
PM12	15	29.91	10.14	2281.91
PM13	15	37.98	9.53	2122.47
PM14	9	38.27	7.6	740.43
PM15	10	38.52	10.08	1523.48
PM16	15	31.02	5.93	666.75
PM17	10	34.95	5.91	431.43
PM18	11	37.68	5.44	388.19
PM19	13	35.33	9.54	1758.32
PM20	12	44.67	8.71	1316.64
PM21	4	44.8	5.9	190.02
PM22	3	49.13	6.16	159.83
PM23	14	48.09	9.54	2010.09
PM24	10	52.62	7.79	852.47
PM25	5	40.87	4.69	125.61
PM26	11	39.3	10.37	1794.6
PM27	9	51.64	8.82	1087.95
PM28	9	48.75	8.02	868.62
PM29	9	47.57	7.06	639.76
PM31	7	41.12	5.49	260.88
PM32	5	37.12	5.8	209.18
PM33	4	41.13	5.75	174.75
PM34	4	45.25	5.94	173.55
Total	295	41.39	7.62	26237.79

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 3 - Estatística do inventário florestal das áreas de macaúba estabelecidas na fazenda Serra Negra

Informação	Unidade	Valores
<i>Área florestal total</i>	ha	24.4
<i>Área da parcela</i>	ha	0.04
<i>Peso médio por parcela</i>	kg/parcela	795.08
<i>Número de parcelas selecionadas</i>	parcela	33
<i>Número de parcelas possíveis</i>	parcela	585
<i>Nível de confiança</i>	%	90
<i>Variância</i>	(kg/parcela) ²	441259.7
<i>Desvio Padrão</i>	kg/parcela	664.27
<i>Coeficiente de variação</i>	%	83.55
<i>Desvio padrão da média</i>	kg/parcela	112.46
<i>t de Student's</i>	t de Student	1.69
<i>Erro calculado</i>	kg/parcela	190.5
<i>Erro calculado</i>	%	23.96
<i>Erro calculado</i>	kg/ha	4762.53
<i>LI of the IC</i>	kg/parcela	604.58
<i>LS of the IC</i>	kg/parcela	985.59
<i>LI of the IC</i>	kg/ha	15114.58
<i>LS of the IC</i>	kg/ha	24639.64

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.6 DISCUSSÃO

Esta é a primeira vez que se aplica a equação alométrica desenvolvida por MOREIRA (2019) em um plantio comercial de macaúbas, assim como é a primeira amostragem florestal em um plantio comercial de macaúba. As unidades amostrais apresentaram grande variabilidade, evidente pelo elevado coeficiente de variação do peso em carbono da amostra. A densidade observada foi de 223 indivíduos por hectare, correspondendo a um pouco mais da metade da densidade projetada para o plantio (400 indivíduos por hectare). As alturas e o número de indivíduos por parcela variaram consideravelmente. Isso contribui para a heterogeneidade da população amostrada. Parcelas com maior número de indivíduos apresentaram indivíduos com maiores alturas. Considerando as diferenças nos tratos culturais em diferentes trechos do plantio, trechos que receberam

melhores tratos culturais resultaram em melhor desenvolvimento e maior sobrevivência de indivíduos. O valor de 19,8 toneladas de carbono por hectare mostra-se distante dos valores obtido por MOREIRA et al. (2020), com 61,6 toneladas de carbono por hectare para um plantio com nove anos. O mesmo para as 25,7 toneladas de carbono por hectare em um plantio de pouco mais de cinco anos. Por outro lado, observa-se um acréscimo de carbono ao sistema de pastagem na ordem de mais de 1500%, considerando o estoque de carbono de uma pastagem não consorciada com macaúba com 1,3 toneladas de carbono por hectare (AMÉZQUITA et al., 2008).

O quantitativo de carbono nesse estudo equipara-se ao das populações naturais de macaúba, onde observam-se valores de 19,4 e 33,9 toneladas de carbono por hectare (TÔLEDO, 2010; FERREIRA et al., 2013). A quantidade de carbono registrada em nosso estudo foi inferior àquela do estudo de MOREIRA et al. (2020). Uma das justificativas é o abandono dos tratos culturais após um ano de plantio. A Tabela 4 apresenta o carbono equivalente por hectare por ano, a densidade de plantio e a quantidade de carbono equivalente por planta por ano para algumas espécies utilizadas em sistemas agroflorestais. Em todos os casos, a macaúba superou as demais espécies em capacidade de fixação de carbono, mesmo na situação de abandono dos tratos culturais.

Tabela 4 - Comparação do carbono equivalente por hectare por ano, densidade de plantação e carbono equivalente por planta por ano entre espécies utilizadas em sistemas agroflorestais (* plantio com 4,7 anos; ** plantio com 9 anos)

Espécies arbóreas	CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Mg)	Densidade (N ha⁻¹)	CO₂eq planta⁻¹ ano⁻¹ (Mg)	Referêncoa
<i>Acrocomia aculeata</i>	6.17	223	0.0277	Our study
<i>Acrocomia aculeata</i> *	19.67	400	0.0492	Moreira et al. 2020
<i>Acrocomia aculeata</i> **	25.13	400	0.0628	Moreira et al. 2020
<i>Hevea brasiliensis</i>	3.24	500	0.0065	Zaro et al. 2020 Mukhopadhyay et Masto 2022
<i>Abizia lebeck</i>	11.22	625	0.018	
<i>Eucalyptus</i> sp	9.09	416	0.0219	Torres et al 2017
<i>Pterogyne nitens</i>	5.25	1111	0.0047	Barreto-Garcia et al. 2019

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.7 CONCLUSÕES

Foi observado acréscimo de carbono ao sistema de pastagem em grande magnitude comparando-se às estimativas de carbono para pastagens não consorciadas. Esse resultado, por si, demonstra a importante contribuição do serviço ecossistêmico de sequestro de carbono que o consórcio pastagem/macaúba provê. Destaca-se que essa é a primeira plantação comercial de macaúba da Zona da Mata de Minas Gerais, assim como uma das primeiras do Brasil. Nesse caso o estoque de carbono observado assemelha-se ao de populações naturais de macaúba.

A utilização de amostragem em conjunto com equação alométrica adequada mostra-se útil na avaliação de estoque de carbono em plantios comerciais de macaúba. Tal procedimento pode contribuir em projetos para geração de créditos de carbono, tanto em sua concepção quanto em sua validação. Além disso, o uso de equações alométricas e amostragem reduz custos com a quantificação de carbono em plantios de macaúba. Tal economia advém da redução de tempo e na dispensa de equipamentos para cubagem e pesagem de biomassa, evitando assim a destruição de indivíduos de palmeiras durante o processo.

3.8 REFERÊNCIAS

AMÉZQUITA, MARÍA CRISTINA MURGUEITIO R., ENRIQUE IBRAHIM, MUHAMMAD RAMÍREZ, Bertha L. Carbon sequestration in pasture and silvo-pastoral systems under conservation management in four ecosystems of tropical America. 2008, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2008. p.1–11.

BARBOSA-EVARISTO, Anderson *et al.* Simulation of macauba palm cultivation: an energy-balance and greenhouse gas emissions analysis.

Carbon Management v. 9, n. 3, p. 243–254 , 2018.

BARRETO-GARCIA, Patrícia Anjos Bittencourt *et al.* Inventory of Organic Carbon in a *Pterogyne nitens* Tul. Plantation in Southwest Bahia, Brazil.

Floresta e Ambiente v. 26, n. 4 , 2019.

COELHO, Ricardo Marques *et al.* Non-biotic factors determining plasticity of the prospective oil-rich macauba palm (*Acrocomia aculeata*).

AGROFORESTRY SYSTEMS v. 93, n. 3, p. 771–782 , jun. 2019.

FERNÁNDEZ-COPPEL, I A *et al.* Life cycle analysis of macauba palm cultivation: A promising crop for biofuel production. **Industrial Crops and Products** cited By 4, v. 125, p. 556–566 , 2018.

FERRARI, Roseli Aparecida; DA AZEVEDO FILHO, Joaquim Adelino.

Macauba as promising substrate for crude oil and biodiesel production.

Journal of Agricultural Science and Technology. B v. 2, n. 10B, p. 1119 , 2012.

FERREIRA, Eloisa Aparecida Belleza *et al.* Estimativa de seqüestro de carbono numa população espontânea de palmeiras macaúba. 2013, São Paulo: [s.n.], 2013. In: 8o Congresso internacional de bioenergia

HE, Xinyue *et al.* The Effects of Interaction between Climate Change and Land-Use/Cover Change on Biodiversity-Related Ecosystem Services.

Global Challenges v. 3, n. 9, p. 1800095 , 6 set. 2019.

MOREIRA, S L S *et al.* Root distribution of cultivated macauba trees.

Industrial Crops and Products v. 137, p. 646–651 , 2019.

MOREIRA, Sandro Lúcio Silva. **Acúmulo de biomassa e carbono em cultivo de macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. Universidade Federal de Viçosa, 2019. 57 p.

MOREIRA, Sandro Lucio Silva *et al.* Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production** v. 265, p. 121628 , 2020.

MUKHOPADHYAY, Sangeeta; MASTO, Reginald E. Comparative evaluation of *Cassia siamea* and *Albizia lebbeck* for their potential to recover carbon and nutrient stocks in a chronosequence post-mining site. **CATENA** v. 208, p. 105726 , jan. 2022.

NDA, Muhammad *et al.* A Review on the Causes, Effects and Mitigation of Climate Changes on the Environmental Aspects. **International Journal of Integrated Engineering** v. 10, n. 4 , 1 ago. 2018.

NEULING, Ulf; KALTSCHMITT, Martin. Biokerosene from Vegetable Oils – Technologies and Processes. In: KALTSCHMITT, Martin; NEULING, Ulf (Orgs.). . **Biokerosene: Status and Prospects**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. p. 758.

PIMENTEL, Leonardo Duarte. *Histórico da implantação de plantio comercial de macaúba* . Olaria: [s.n.] . , 2020

R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing* . Vienna, Austria: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>> . , 2022

TÔLEDO, Diego de Paula. **Análise técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão manso como alternativas de agregação de renda na cadeia produtiva do biodiesel**. Universidade Federal de Viçosa, 2010. 92 p.

TORRES, Carlos Moreira Miquelino Eleto *et al.* Greenhouse gas emissions and carbon sequestration by agroforestry systems in southeastern Brazil. **Scientific Reports** v. 7, n. 1, p. 16738 , 1 dez. 2017.

XU, Chi *et al.* Future of the human climate niche. **Proceedings of the National Academy of Sciences** v. 117, n. 21, p. 11350–11355 , 26 maio 2020.

ZARO, Geovanna C. *et al.* Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil. **Agroforestry Systems** v. 94, n. 3, p. 799–809 , 8 jun. 2020.

4 CAPÍTULO 3 - ACROCOMIA ACULEATA (MACAÚBA): MODELANDO, PREVENDO E PROJETANDO UM NOVO E LUCRATIVO SUMIDOURO GLOBAL DE CARBONO.

4.1 RESUMO

A utilização de técnicas de modelagem de distribuição de espécies (SDM) pode ser útil para avaliar as áreas adequadas atuais, futuras e passadas para uma espécie. Uma das abordagens mais recorrentes em SDM atualmente é a utilização de algoritmos em conjunto. A utilização de variáveis ambientais, além de variáveis bioclimáticas, pode trazer maior clareza aos modelos. Isso pode auxiliar tanto na compreensão das áreas adequadas para a espécie modelada quanto na previsibilidade de situações futuras, especialmente aquelas relacionadas às mudanças no clima. O objetivo foi determinar as áreas climaticamente e ambientalmente adequadas para o cultivo de macaúba (*Acrocomia aculeata*) no Brasil, para os cenários do presente e futuro, considerando cenários de emissões intermediárias (SSP 245) e pessimistas (SSP 545) até o final do século, utilizando algoritmos em conjunto, múltiplos modelos de circulação global (GCMs) e variáveis ambientais que contemplem solo e vegetação, além das variáveis bioclimáticas. A hipótese é que a macaúba será tolerante às mudanças no clima, sem grandes alterações em sua área adequada atual e com uma eventual expansão das áreas adequadas em direção ao sul do Brasil para os cenários futuros. As variáveis bioclimáticas foram obtidas a partir da base de dados WorldClim na resolução de 2,5 minutos para os cenários presente e futuros. Para as previsões futuras, foram selecionados os modelos globais de clima. Foram considerados os GCMs para os períodos de 2041 a 2060 e de 2081 a 2100. Os dados de ocorrência foram obtidos a partir das bases de dados online, como SpeciesLink, GBIF e iNaturalist, além de ocorrências obtidas da literatura. As variáveis ambientais, juntamente com os pontos de ocorrência, foram submetidas à análise de colinearidade. Foram

selecionadas sete variáveis bioclimáticas, além de pH e matéria orgânica do solo, classes de solo e de vegetação. Procedeu-se à adequação e avaliação do modelo de distribuição considerando seis algoritmos. Os modelos foram unidos em conjunto, considerando a média de todos os modelos gerados, utilizando como limite a soma da sensibilidade com a especificidade. Todos os algoritmos selecionados apresentaram um desempenho de 100%, gerando 60 modelos para a distribuição atual de *Acrocomia aculeata* no Brasil. Os valores da AUC-ROC foram todos acima de 0,81. Os valores da TSS foram todos acima de 0,54. As áreas adequadas de macaúba concentram-se nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Observou-se, em todas as situações futuras, uma notável expansão das áreas adequadas para a ocorrência da macaúba. Na área adequada atual obtida pelo SDM, ocorrem mais 21 milhões de hectares de pastagens onde é possível sequestrar 0,42 Gt (gigatonelada) de carbono por ano (0,7% das emissões globais para o ano de 2019). A hipótese de resiliência às mudanças no clima para *A. aculeata* foi demonstrada usando múltiplos algoritmos em conjunto e diferentes GCMs.

Palavras-chave: macaúba; modelagem de distribuição de espécies; Brasil; sequestro de carbono.

4.2 ABSTRACT

Species distribution modeling (SDM) techniques are valuable for assessing suitable areas for a species in the present, future, and past. One of the most common approaches in current SDM involves the simultaneous use of algorithms. The use of environmental variables in addition to bioclimatic variables can bring greater clarity to models. This can help both in understanding suitable areas for the modeled species and in predicting future situations, especially those related to changes in climate. The objective was to determine suitable areas for growing macauba (*Acrocomia aculeata*) in Brazil under present and future scenarios. This assessment considered intermediate (SSP 245) and pessimistic (SSP 545) emissions scenarios until the end of the century. The study utilized a combination of algorithms, multiple global circulation models (GCMs), and environmental variables, including soil and vegetation, in addition to bioclimatic variables. Our hypothesis is that macauba will be tolerant to changes in climate, without major alterations to its current suitable area and with a possible expansion of suitable areas towards the south of Brazil for future scenarios. The bioclimatic variables were obtained from the WorldClim database at 2.5 min resolution for the present and future scenarios. Global climate models were selected for future forecasts. GCMs were considered for the periods 2041 to 2060 and 2081 to 2100. Occurrence data was obtained from online databases such as SpeciesLink, GBIF, and Inaturalist, as well as occurrences obtained from the literature. The environmental variables, together with the occurrence points, were subjected to collinearity analysis. Seven bioclimatic variables were selected, as well as soil pH and organic matter, soil, and vegetation classes. The distribution model was adjusted and assessed using six different algorithms. The models were ensembled considering the average of all the models generated, using the sum of sensitivity and specificity as the limit. All the selected algorithms performed at 100%, generating 60 models for the current distribution of *Acrocomia aculeata* in Brazil. The AUC-ROC values were all above 0.81. The TSS values were all above 0.54. Suitable macauba areas are concentrated in

the Southeast and Center-West regions. In all future situations, there was a notable expansion of the areas suitable for macauba. Within the current suitable area determined by the SDM, there are an additional 21 million hectares of pastures where it is possible to sequester 0.42 Gton (gigaton) of carbon per year (equivalent to 0.7% of global emissions in 2019). The climate change resilience hypothesis for *A. aculeata* was demonstrated using multiple algorithms together and different GCMs.

Keywords: macaúba; species distribution modeling; Brazil; carbon sequestration.

4.3 INTRODUÇÃO

A macaúba, *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart. (Arecaceae), é uma palmeira nativa das Américas com ampla distribuição (COELHO et al., 2018). Ela tem sido descrita como uma espécie oleaginosa alternativa e vem sendo estudada como uma nova cultura agrícola sucedânea da palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq. - Arecaceae) (COLOMBO et al., 2017). A palma africana é uma cultura agrícola responsável por altas taxas de desmatamento em nível global, cultivável apenas em biomas de floresta tropical equatoriais, cujos óleos vegetais são altamente demandados ao redor do mundo (VIJAY et al., 2016). Ao contrário da palma africana, a macaúba não tem restrições edafoclimáticas à faixa tropical do globo, estando adequada a temperaturas mais amenas e precipitações anuais de pelo menos 1000 mm (MOTTA et al., 2002). Também tem um porte um pouco menor em relação à palma africana, o que permite produção agrícola ou pecuária multiestratificada, configurando um modelo agroflorestal (CARDOSO et al., 2017). Além dos atributos ambientais vantajosos em relação à palma africana, tem-se uma estimativa semelhante de produtividade de óleos, em torno de 4000 kg por hectare. No entanto, tal estimativa está pautada ou na coleta extrativista de populações naturais ou na colheita de plantios comerciais experimentais de progênies não domesticadas. Estudos considerando a seleção de progênies mais produtivas sugerem que se alcance uma produtividade em torno de 10,000 kg de óleo por hectare (BERTON et al., 2013). Dessa maneira, o emprego do modelo agroflorestal, especialmente no consorciamento entre pastagens e macaúba, supera o conflito entre produção de energia e alimentos.

Entre as iNDCs (contribuições nacionalmente pretendidas - principais compromissos e contribuições do Brasil para o acordo climático negociado e aprovado em Paris) do Brasil está a recuperação de pastagens de 15 milhões de hectares (REIS et al., 2017). O plantio de macaúba consorciado a pastagens degradadas possibilita a recuperação dessas pastagens através da adubação convencional e da retirada do gado durante os quatro anos

iniciais de desenvolvimento da palmeira. Posteriormente, a adubação de manutenção auxilia a continuidade da melhoria da qualidade das pastagens consorciadas com macaúba (PIMENTEL, 2022, com. pess.).

A implantação de novas culturas agrícolas, como a macaúba, a partir de espécies nativas, requer várias etapas que passam pela seleção de progênies que melhor respondam às demandas de produtividade. Além disso, é importante reconhecer quais são as áreas adequadas para a espécie, considerando planejamentos de plantios de macaúba em larga escala.

Desta forma, a utilização de técnicas da modelagem de distribuição de espécies (SDM) pode ser útil para avaliar as áreas adequadas atuais, futuras e passadas para uma espécie. Uma das abordagens mais recorrentes em SDM atualmente é a utilização de algoritmos em conjunto (HENDERSON et al., 2022; SARAIVA et al., 2021). Isso é importante, pois não é possível saber previamente qual algoritmo terá melhor performance. Utilizando-se limites estatísticos aceitáveis e gerando um modelo em conjunto dos melhores modelos obtidos, é possível obter um modelo representativo para o cenário que se deseja analisar. A utilização de variáveis ambientais que reflitam aspectos importantes para a sobrevivência de espécies analisadas em SDM, além de variáveis bioclimáticas, pode trazer maior clareza aos modelos. Isso pode auxiliar tanto na compreensão das áreas adequadas para a espécie modelada quanto na previsibilidade de situações futuras, especialmente aquelas relacionadas às mudanças no clima. Nesse sentido, é possível tomar decisões tanto sob o aspecto da conservação de espécies quanto na implementação de culturas agrícolas, passando pelo manejo de potenciais espécies invasoras (LIRA-NORIEGA et al., 2018; COLEVATTI et al., 2012; WATTEYN et al., 2020).

Além dos aspectos agrônômicos supracitados, a macaúba se demonstra como uma espécie vegetal robusta, sendo: resistente a incêndios florestais (BICALHO et al., 2016); tendo boa modulação entre ambientes sombreados e totalmente iluminados sem alteração do aparato fotossintético (CALZAVARA et al., 2015); suportando altos teores de CO₂ atmosférico, demonstrado em casa de vegetação, além de significativa recuperação da capacidade fotossintética após eventos de seca prolongada (ROSA et al., 2019).

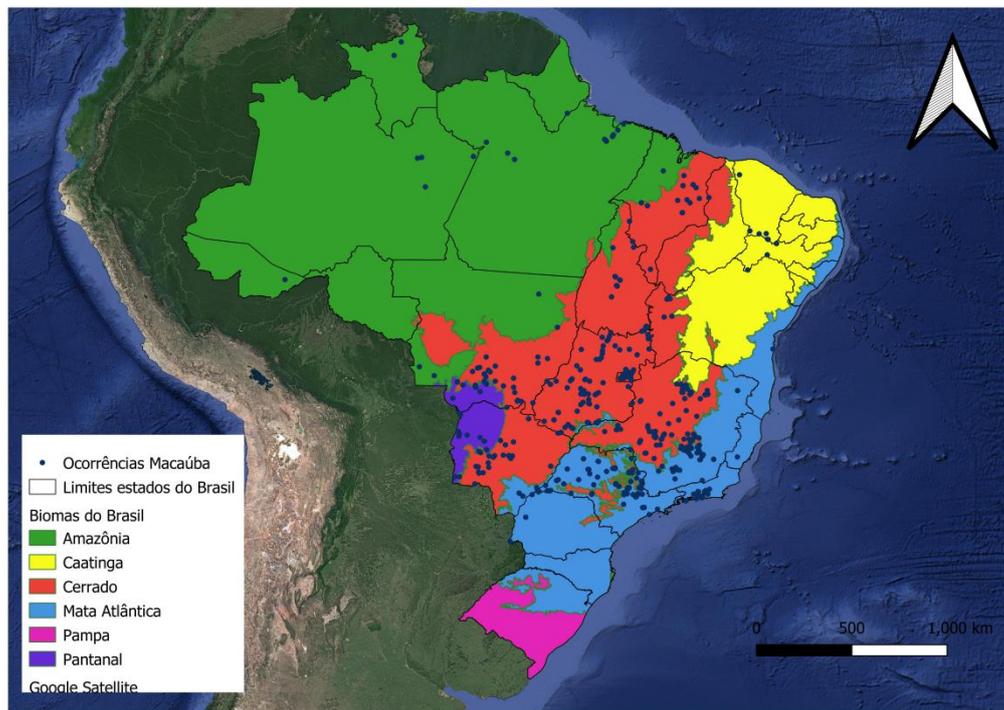
Assim, o objetivo foi determinar as áreas climaticamente e ambientalmente adequadas para o cultivo de macaúba no Brasil, para os cenários do presente e futuro, considerando cenários de emissões (Caminhos Socioeconômicos Compartilhados - SSP) intermediário (SSP 245 - aquecimento global de até 2.7°C) e pessimista (aquecimento global de até 4.4°C) até o final do século, utilizando algoritmos em conjunto, múltiplos modelos de circulação global (GCMs) e variáveis ambientais que contemplem solo e vegetação, além das variáveis bioclimáticas. A hipótese é que a macaúba será tolerante às mudanças no clima, sem grandes alterações de sua área adequada atual e com uma eventual expansão das áreas adequadas em direção ao sul do Brasil para os cenários futuros.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Área de estudo

A área de estudo compreende os limites do Brasil em função da disponibilidade de dados ambientais padronizados (Figura 3). Esses dados foram considerados importantes para a espécie. Além disso, o Brasil é tido como centro de dispersão da espécie (LANES et al., 2015), onde também estão a maioria de seus registros. O Brasil localiza-se na América do Sul, sendo atravessado por clima tropical e subtropical e coberto por seis diferentes biomas (IBGE 2019). Desses biomas, dois são predominantemente compostos por florestas latifoliadas (Amazônia e Mata Atlântica), outros dois são predominantemente compostos por florestas sazonais (Cerrado e Caatinga), um deles é composto predominantemente por vegetação campestre (Pampa) e o último deles é composto por florestas sazonais sujeitas a alagamento (IBGE 2019).

Figura 3 - Limites do Brasil, sua respectiva divisão em biomas e estados e pontos de ocorrência da macaúba no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.4.2 Espécie alvo

Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd. ex Mart. é uma palmeira (Arecaceae) (Figura 4), pertencente à tribo Cocoeae e à subtribo Bactridinae (GUNN 2004), nativa das Américas. Distribui-se desde o sul da Flórida nos Estados Unidos até o norte da Argentina (LIMA *et al.*, 2018). É reconhecida por seu grande potencial como oleaginosa comercial, superando a maioria das espécies oleaginosas convencionais (COLOMBO *et al.*, 2017), mesmo em estado selvagem e em populações naturais.

Figura 4 - Aspecto da macaúba em plantio comercial.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

4.4.3 Variáveis Climáticas e Ambientais

As variáveis bioclimáticas foram obtidas a partir da base de dados WorldClim (FICK et HIJMANS, 2017) com uma resolução de 2,5 minutos (equivalente a 5 km²) para os cenários presente e futuros. Para as previsões futuras, foram selecionados os modelos globais de clima (GCM) BCC-CSM2-MR, CanESM5-CanOE, IPSL-CM6A-LR e MIROC6. Consideramos os GCMs para os períodos de 2041 a 2060 e de 2081 a 2100, além dos cenários de emissões SSP (*Shared Socio-economic Pathways*) 245 e SSP 585.

O cenário de emissões SSP2-4.5 (também conhecido como SSP245) considera uma trajetória em que as emissões de gases do efeito estufa são mitigadas ao longo do tempo. Nesse cenário, existe a possibilidade de

manter o aumento da temperatura média global em até 2,4 a 2,6 °C acima dos níveis pré-industriais até o final do século.

Por outro lado, o cenário SSP5-8.5 (SSP585) representa uma trajetória de emissões mais alta, com aumento contínuo e substancial das emissões de gases do efeito estufa. Nesse cenário, é esperado um aumento na temperatura média global de 4,0 a 5,7 °C acima dos níveis pré-industriais até o final do século. É importante ressaltar que esses números são estimativas baseadas em modelos climáticos e consideram uma série de suposições sobre as emissões futuras, os esforços de mitigação e outros fatores. No entanto, eles fornecem uma visão geral dos possíveis cenários climáticos com base nas diferentes trajetórias de emissões.

Para as variáveis ambientais relacionadas à vegetação, utilizamos o shapefile obtido a partir do mapeamento feito pelo IBGE (2023). Também obtivemos dados ambientais sobre solos brasileiros da EMBRAPA (2023). Estes dados de cobertura vegetal e classificação de solos foram rasterizados e reclassificados de forma a terem um tamanho de pixel de 5 km², com a extensão e projeção do mapa resultante compatíveis com as variáveis bioclimáticas. Além disso, obtivemos imagens raster para pH, matéria orgânica e teor de argila a partir da base de dados SoilGrids (POGGIO et al., 2021). O conjunto de rasters para cada variável do SoilGrids foi mesclado e, em seguida, os rasters foram reclassificados utilizando o método do vizinho mais próximo, de modo que o valor de cada pixel correspondesse a 5 km².

4.4.4 Modelagem da Distribuição de Espécies

Apresentam-se a seguir as etapas metodológicas para a modelagem da distribuição de espécies.

4.4.4.1 *Dados de ocorrência*

Os dados de ocorrência foram obtidos a partir das bases de dados online como: SpeciesLink, GBIF e Inaturalist, além de ocorrências obtidas da literatura. Antes da consolidação das ocorrências oriundas das diferentes bases de dados, foram verificadas manualmente ocorrências de natureza duvidosa e, quando detectadas, foram removidas. Também foi verificada a presença de duplicatas, as quais foram eliminadas em cada uma das bases de dados originais. Registros fora dos limites do Brasil não foram considerados. Por fim, foram selecionados 603 pontos de ocorrência para a espécie de macaúba (Figura 3).

4.4.4.2 *Variáveis preditoras*

Todos os rasters com as variáveis bioclimáticas e ambientais foram mascarados e cortados na extensão dos limites da área de estudo e na projeção adequada (WGS 84). Tais dados, juntamente aos pontos de ocorrência, foram submetidos à análise de colinearidade através do argumento `vifstep` do pacote `usdm` no ambiente R (R CORE TEAM, 2022). Dessa maneira, foram selecionadas sete variáveis bioclimáticas: bio 7 (variação de temperatura anual), bio 10 (temperatura média do quarto mais quente), bio 11 (temperatura média do quarto mais frio), bio 12 (precipitação anual), bio 13 (precipitação do mês mais úmido), bio 14 (precipitação do mês mais seco) e bio 18 (precipitação do quarto mais quente). Além dessas, foram selecionadas quatro variáveis ambientais: camadas de pH e matéria orgânica do solo, assim como as camadas de classes de solo e de vegetação.

4.4.4.3 *Modelo de distribuição*

De posse dos pontos de ocorrência e das variáveis ambientais selecionadas e ajustadas, procedeu-se com a definição dos pontos de pseudo-ausência através da função `sdmData`, considerando-se a geração de 10.000 pontos de pseudo-ausência. Em seguida, procedeu-se com a adequação e avaliação do modelo de distribuição considerando os algoritmos `maxlike` (máxima entropia), `mars` (regressão spline adaptativa multivariada), `mda` (análise de mistura discriminante), `svm` (Support Vector Machine), `domain.dismo` e `brt` (árvores de regressão aumentadas). Nesse caso, foram utilizados 25% dos pontos de ocorrência para treinamento com 10 repetições para cada algoritmo. Em seguida, procedeu-se com a predição da adequabilidade em cada um dos 60 modelos resultantes. Por fim, os modelos foram unidos em conjunto considerando a média de todos os modelos gerados, utilizando como limite a soma da sensibilidade com a especificidade (LIU et al., 2009).

Para o futuro, foram realizados os mascaramentos e cortes de cada conjunto de variáveis bioclimáticas para cada um dos GCMs nos períodos e nos cenários de emissões considerados. Também foram selecionadas as variáveis bioclimáticas conforme a análise de colinearidade realizada para o presente. Tais camadas foram reunidas com as variáveis ambientais de solo e vegetação para cada uma das GCMs nos períodos e cenários de emissões escolhidos. Posteriormente, foi realizada a predição de cada um dos GCMs considerando o modelo geral para o presente. Em seguida, foi realizada a união em conjunto de cada um dos modelos, considerando a média de todos os modelos gerados para cada um dos GCMs, utilizando como limite a soma da sensibilidade com a especificidade.

Todos os conjuntos de modelos dos diferentes GCMs foram somados para os diferentes cenários de emissões e períodos de análise. Em seguida, os resultados desses somatórios foram binarizados utilizando como limite a soma da sensibilidade com a especificidade. Valores acima desse limite foram considerados como presença e valores abaixo foram considerados como ausência.

Por fim, realizou-se a subtração dos rasters futuros (binarizados de cada cenário de emissões para cada período analisado) do raster gerado para o presente. Desse modo, obtiveram-se as áreas que sempre foram inadequadas para a espécie, as áreas de retração, as áreas estáveis e as áreas de expansão para cada período e para cada cenário de emissões.

4.4.4.4 *Potencial de sequestro de carbono nas áreas adequadas*

Considerando a proposta de consorciamento de macaúba com pastagens, com o objetivo de produção de energia e alimentos em modelos produtivos multiestratificados, foi selecionada a área adequada atual, a qual foi vetorizada. Em seguida, obteve-se o raster da área de pastagem a partir da base MapBiomass no ano de 2019 para o Brasil. A área de pastagem foi cortada a partir da área atual adequada obtida para macaúba e foi, em seguida, vetorizada. A partir daí, obteve-se a área de pastagens disponível dentro da área adequada atual para macaúba em hectares. Em seguida, utilizou-se a estimativa de sequestro de carbono para macaúba obtida por MOREIRA et al. (2020), que corresponde a aproximadamente 20 toneladas de carbono equivalente por hectare por ano em uma densidade de 400 indivíduos por hectare. Ressalta-se que a unidade carbono equivalente considera o potencial de aquecimento global que diferentes gases do efeito estufa causam à atmosfera (conferir capítulo 2 da tese). Esse valor de sequestro de carbono foi multiplicado pela área de pastagem contida na área adequada para a macaúba no presente para estimar o potencial de sequestro de carbono da macaúba em um cenário de plantio massivo no Brasil.

4.5 RESULTADOS

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos nesse estudo.

4.6 Performance dos modelos

Todos os algoritmos selecionados apresentaram 100% de desempenho, gerando 60 modelos para a distribuição atual de *Acrocomia aculeata* no Brasil (Tabela 5). Os valores da curva característica de operação do receptor e a área sob a curva de resposta (AUC-ROC) foram todos acima de 0.81. Tais valores podem ser interpretados como indicativos de modelos confiáveis e úteis (HENDERSON *et al.*, 2022). Adicionalmente, os valores da estatística verdadeira de habilidade (TSS) foram todos acima de 0.54, os quais podem ser considerados como indicativos de modelos úteis (BARROS-ROSA *et al.*, 2022).

Tabela 5 - Performance dos modelos para *Acrocomia aculeata* obtidos a partir dos algoritmos selecionados onde AUC é área sob a curva de resposta TSS é estatística verdadeira de habilidade.

Algoritmos	AUC	TSS
maxlike	0.81	0.54
mars	0.87	0.63
mda	0.83	0.56
svm	0.87	0.6
domain.dismo	0.81	0.55
brt	0.88	0.64

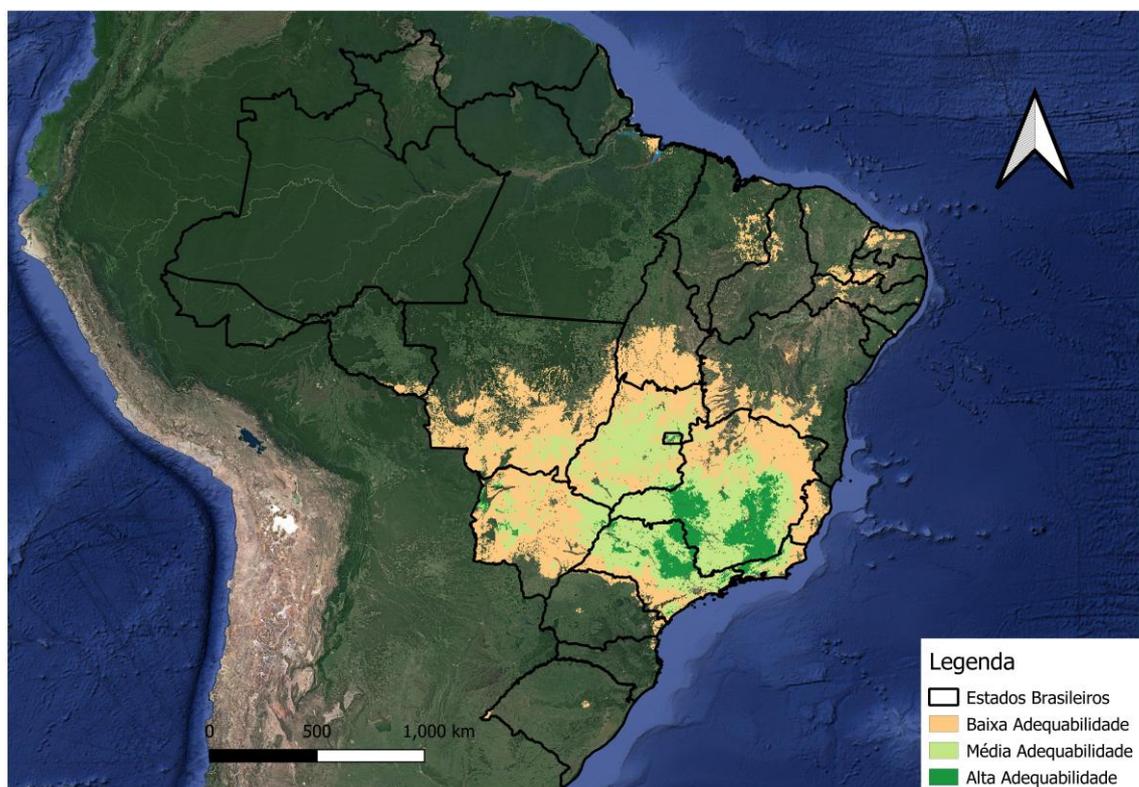
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.7 Áreas de adequabilidade nos biomas e estados brasileiros

Considerando a distribuição atual, utilizou-se o limite de corte máximo da soma da sensibilidade e especificidade (0,2047034) em que valores abaixo desse foram considerados como áreas inadequadas. Valores entre 0,2047034 e 0,30 foram considerados áreas de baixa adequabilidade, valores entre 0,30 e 0,40 áreas de média adequabilidade e valores acima de 0,41

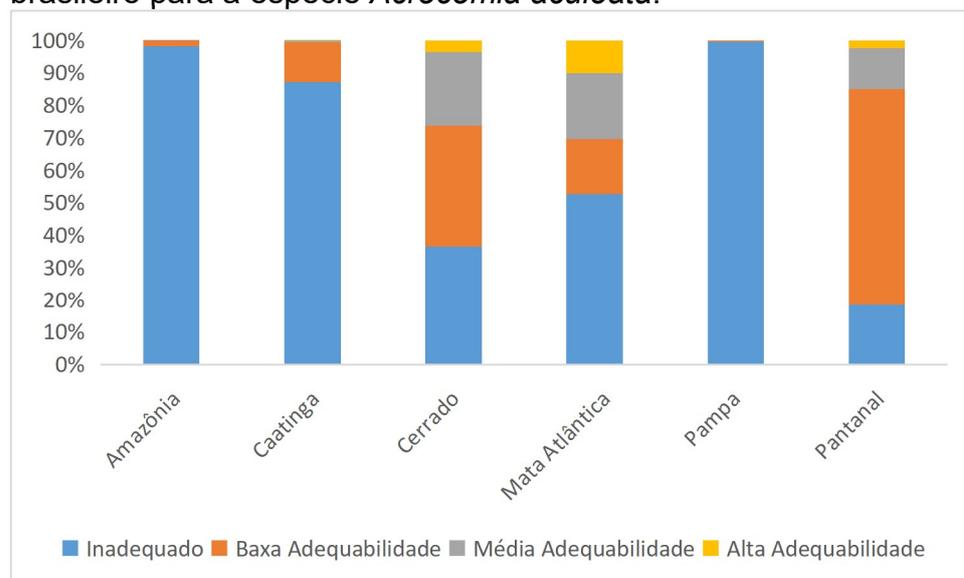
como áreas com alta adequabilidade (Figura 5). Sobrepondo esse mapa raster ao mapa de biomas e estados brasileiros tem-se que: 1) para o território do Brasil, 77% da área foi classificada como inadequada, considerando pixels com valores abaixo da linha de corte e pixels sem dados (NA); 2) as áreas com maior adequabilidade correspondem a 2% do território do Brasil, estando presentes em sua maioria no bioma Mata Atlântica seguido do bioma Cerrado, com uma pequena contribuição nos biomas Pantanal e Caatinga; 3) as áreas com média adequabilidade correspondem a 8% do território do Brasil, predominando no bioma Cerrado, seguido respectivamente dos biomas Mata Atlântica, Pantanal, Caatinga e Amazônia; 4) as áreas de baixa adequabilidade correspondem a 14% do território do Brasil, predominando no bioma Cerrado, seguido dos biomas Mata Atlântica, Caatinga, Pantanal e Amazônia, com uma pequena quantidade também no Pampa (Figura 6).

Figura 5 - Mapa de adequabilidade atual para *Acrocomia aculeata* considerando diferentes faixas de adequabilidade. Os limites dos estados são apresentados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 6 - Percentual de áreas com adequabilidade ambiental por bioma brasileiro para a espécie *Acrocomia aculeata*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Considerando as regiões e estados do Brasil, observa-se que as ocorrências de macaúba se concentram nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, onde, com exceção do Mato Grosso, todos os estados dessas regiões têm uma proporção de mais de 70% de seus territórios com áreas adequadas à macaúba. Tais proporções podem chegar a 96% em Goiás e 93% em Minas Gerais. Os estados com maior proporção de áreas com alta adequabilidade foram, respectivamente, o Distrito Federal, Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, com valores entre 23% e 16% de proporção de áreas de melhor adequabilidade em relação ao total. Com exceção de Pernambuco, não foram observadas áreas de melhor adequabilidade nos estados das regiões Norte, Nordeste e Sul. No caso de Pernambuco, as ocorrências de macaúba provavelmente estão associadas às florestas de brejo no interior do estado.

As áreas de média adequabilidade estão predominantemente nos estados do Distrito Federal, Goiás, São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, com proporções entre 52% e 46% de áreas de média adequabilidade em relação aos territórios totais desses estados. Estados com maiores proporções de áreas de baixa adequabilidade para macaúba foram o Espírito Santo e o Mato Grosso do Sul, respectivamente com 72% e 57% de áreas de baixa adequabilidade em relação aos territórios totais dos estados. Com

exceção dos estados do Amazonas e Roraima, que não apresentaram áreas adequadas, todos os demais estados apresentaram áreas com alguma adequabilidade, onde Rio Grande do Sul, Pará, Acre e Amapá apresentaram proporções inferiores a 1% de áreas com alguma adequabilidade em relação ao total de seus territórios (Tabela 6).

Tabela 6 - Áreas com diferentes adequabilidades de *Acrocomia aculeata* por estado brasileiro.

Estado	Região	Inadequado	Baixa	Média	Alta
Distrito Federal	Centro-oeste	8%	13%	56%	23%
Goiás	Centro-oeste	3%	42%	54%	1%
Mato Grosso	Centro-oeste	64%	32%	3%	0%
Mato Grosso do Sul	Centro-oeste	20%	58%	21%	2%
Alagoas	Nordeste	98%	2%	0%	0%
Bahia	Nordeste	85%	14%	1%	0%
Ceará	Nordeste	93%	6%	0%	0%
Maranhão	Nordeste	94%	6%	0%	0%
Paraíba	Nordeste	85%	15%	0%	0%
Pernambuco	Nordeste	89%	10%	1%	0%
Piauí	Nordeste	96%	4%	0%	0%
Rio Grande do Norte	Nordeste	81%	19%	1%	0%
Sergipe	Nordeste	97%	3%	0%	0%
Acre	Norte	100%	0%	0%	0%
Amapá	Norte	100%	0%	0%	0%
Amazonas	Norte	100%	0%	0%	0%
Pará	Norte	100%	0%	0%	0%
Rondônia	Norte	96%	4%	0%	0%
Roraima	Norte	100%	0%	0%	0%
Tocantins	Norte	58%	42%	0%	0%
Espírito Santo	Sudeste	23%	73%	4%	1%
Minas Gerais	Sudeste	7%	29%	43%	21%
Rio de Janeiro	Sudeste	10%	30%	43%	17%
São Paulo	Sudeste	8%	22%	50%	19%
Paraná	Sul	93%	7%	0%	0%
Rio Grande do Sul	Sul	99%	1%	0%	0%
Santa Catarina	Sul	99%	1%	0%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.8 Comportamento da Macaúba para os cenários futuros

No modelo para o período atual, observa-se que 77% do território brasileiro apresenta-se como inadequado. Comparando-se os diferentes cenários futuros de emissões e períodos analisados (Tabela 7; Figura 7), observa-se em todas as situações uma notável expansão das áreas adequadas para a ocorrência da macaúba. No cenário de menores emissões nos períodos de 2041 a 2060 e de 2081 a 2100, observa-se uma expansão ligeiramente menor que a observada no cenário de maiores emissões para os mesmos períodos. O mesmo observa-se para as retrações, as quais foram menores no cenário de maiores emissões. Nos dois cenários observa-se uma pequena ampliação das áreas de retração no período de 2080 a 2100. De maneira geral, a soma das áreas estáveis e de expansão nos dois períodos e nos dois cenários de emissões, mesmo considerando as retrações, apresenta uma ampliação das áreas adequadas que se aproxima do dobro da área adequada para o período atual.

Em linhas gerais, observa-se nos dois cenários para os dois períodos selecionados uma expansão das áreas adequadas ao norte em direção a boa parte do bioma Catinga e ao norte do bioma Cerrado. A expansão nessa parte ao norte do Brasil mostra-se maior no período de 2041 a 2060 do que no período de 2081 a 2100, sendo que no cenário de maiores emissões a expansão será maior para essa parte do Brasil no período intermediário analisado.

Tabela 7 - Valores das áreas de retração, inadequadas, estáveis e de expansão para *Acrocomia aculeata* nos diferentes cenários de emissão de gases do efeito estufa para os períodos de 2041 a 2060 e 2081 a 2100

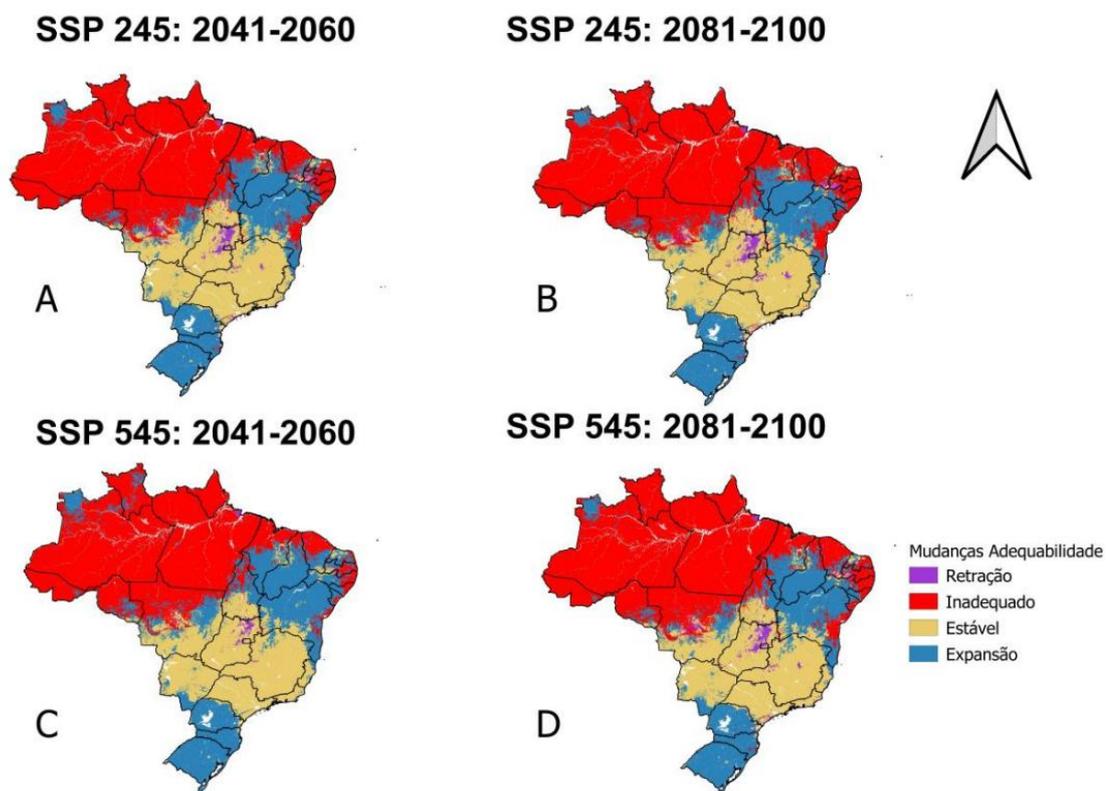
Cenários e períodos	Retração		Inadequada		Estável		Expansão		Total
	<i>Km</i> ²	%	<i>Km</i> ²	%	<i>Km</i> ²	%	<i>Km</i> ²	%	
Atual	-	-	6110135,124	74%	2144768,928	26%	-	-	8254904,052
SSP245_2041-2060	119610,8043	1,45%	4381795,906	53,08%	1977246,352	23,95%	1776250,991	21,52%	8254904,052
SSP245_2081-2100	139289,1929	1,69%	4501639,025	54,53%	1957567,963	23,71%	1656407,872	20,07%	8254904,052
SSP585_2041-2060	48310,0892	0,59%	4045445,757	49,01%	2048547,067	24,82%	2112601,139	25,59%	8254904,052
SPP585_2081-2100	77216,94837	0,94%	4255555,959	51,55%	2019640,207	24,47%	1902490,937	23,05%	8254904,052

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na região amazônica, observa-se áreas com maiores ou menores expansões na parte noroeste do estado do Amazonas, nos dois cenários e nos dois períodos. As maiores expansões para a região amazônica foram observadas no cenário SSP585, sendo um pouco maior na parte sul da região amazônica no período de 2041-2060. Posteriormente, no período de 2081 a 2100, no cenário SSP585, essa parte ao sul apresentará uma menor expansão e será observada uma aumento da expansão no estado de Roraima e em suas imediações, na divisa com o Amazonas. Essa expansão também está prevista no cenário de emissões intermediário (SSP245), porém mostra-se um pouco menos expressiva nessa parte da região amazônica.

Na região sul do Brasil, observa-se expansão total em todos os cenários para todos os períodos, onde o trecho sul do bioma Mata Atlântica será completamente preenchido por áreas adequadas, assim como o bioma Pampa.

Figura 7 - Previsão do comportamento de *Acrocomia aculeata* nos diferentes cenários de emissão de gases do efeito estufa (SSP - *Shared Socio-economic Pathways* 245 e 585) - para os períodos de 2041 a 2060 e 2081 a 2100.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.9 Potencial de sequestro de carbono nas áreas adequadas

Na área adequada atual obtida pelo SDM ocorrem mais de 21 milhões de hectares de pastagens, o que corresponde a 10% da área adequada atual. Considerando o valor de 20 toneladas de carbono equivalente por hectare por ano sequestrado em uma densidade de 400 indivíduos de macaúba por hectare (MOREIRA *et al.*, 2020), é possível sequestrar 0,42 Gton (giga tonelada) de carbono ao ano, caso todas as pastagens na área adequada atual para macaúba venham a ser consorciadas com macaúba na densidade citada. Esse valor corresponde a 0,7% das emissões globais para o ano de 2019, segundo o último relatório do IPCC (2022) (Tabela 8).

Tabela 8 - Área de pastagem na zona adequada atual para *Acrocomia aculeata*, valor de sequestro de carbono por hectare ano, contribuição ao sequestro de carbono global em gigatoneladas e percentual sequestrado em relação às emissões globais de 2019, onde ha = hectares; ton = tonelada; co₂ eq= gas carbônico equivalente definido no capítulo 2; Gton = gigatonelada.

Area pastagem adequada atual (ha) - mapbiomas	Sequestro macauba ton ha (co ₂ eq)	Sequestro macauba area total (co ₂ eq) Gton	percentual sequestro global (59 Gton ano)
21,085,333.54	20	0.42	0.7%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.10 DISCUSSÃO

A hipótese de resiliência às mudanças no clima para *A. aculeata* foi demonstrada usando múltiplos algoritmos em conjunto e diferentes GCMs. Comparando-se a área adequada no cenário presente aos resultados obtidos por PLATH *et al.* (2016), observa-se uma grande congruência com os nossos resultados. Assim como o que encontramos, os referidos autores apresentaram áreas adequadas na porção central do Brasil, logo acima da região Sul e que passam pelos biomas Mata Atlântica e Cerrado, se estendendo ao norte até meados do estado do Tocantins. Nossos resultados

também apresentaram uma região com área adequada ao norte do bioma Cerrado, entre o Maranhão e Tocantins, bem como os autores citados. Além das áreas mencionadas, foi observada uma região com área adequada na porção ao norte do bioma Caatinga, associada às fitofisionomias de Savana Estépica Arborizada e Savana Estépica Florestada. Apesar dos diferentes métodos utilizados entre nosso estudo e o de PLATH et al. (2016), observa-se que o modelo de distribuição para o presente foi congruente de maneira geral.

A hipótese de resiliência foi pautada em resultados experimentais obtidos em casa de vegetação, onde mudas de macaúba não apresentaram danos quando expostas a altos teores de gás carbônico (LANES et al., 2015). As condições do experimento são semelhantes às projetadas no pior cenário de emissões de gases do efeito estufa. Além disso, nossa hipótese foi apoiada na resistência da planta à seca, onde observa-se uma recuperação da capacidade de fotossíntese após eventos de seca prolongada (LANES et al., 2015). Também foram acrescentadas variáveis ambientais que não foram consideradas por PLATH et al. (2016), como vegetação e parâmetros do solo (classificação de solos, argila, pH e matéria orgânica). Essas variáveis ambientais são postuladas por MOTTA et al. (2002) como aspectos importantes para *A. aculeata*, onde solos com pH ácido, altos teores de matéria orgânica, solos argilosos e associação com florestas estacionais semidecíduais são aspectos ecológicos e ambientais importantes para a espécie.

Nos dois cenários de emissões considerados e nos dois períodos analisados, observa-se uma grande expansão de áreas adequadas para macaúba e uma forte manutenção das áreas estáveis. Nas projeções para o futuro (mapas binários), foram observados acréscimos na área adequada para *A. aculeata* que variaram de 68% a 94%. Dessa forma, pode-se estabelecer que *A. aculeata* apresenta-se como uma espécie resiliente às mudanças no clima, onde os ganhos em áreas adequadas são muito superiores às perdas, que variam de 0,59% a 1,69% dependendo do cenário ou do período observado.

De acordo com o MapBiomias (SOUZA et al., 2020), o Brasil, em 2019, tinha 154 milhões de hectares de pastagens, dos quais 13,9% estavam nas

áreas adequadas atuais para macaúba. O plantio na densidade de 400 indivíduos por hectare representa um número adequado para o consorciamento de macaúba com pastagens sem causar prejuízos à pastagem para uso extensivo (COLOMBO et al., 2017). O estabelecimento dessa nova cultura agrícola em toda a área atual pode contribuir com a descarbonização global em duas vias: sequestro de carbono e produção de biocombustíveis sustentáveis. O resultado mostra a manutenção da maioria dessas áreas de pastagem mesmo nos cenários de maiores emissões até o final deste século. Considerando apenas o sequestro de carbono, é possível adicionar um novo sumidouro global de 0,42 GTon de CO₂.eq. anuais. Esse sumidouro de carbono representado pela macaúba é equiparável aos respectivos 0,1 e 0,61 GTon de CO₂.eq. anuais das florestas da bacia Amazônica e da bacia do Rio Congo, tendo como parâmetro os 8,7 GTon de CO₂ eq sequestrados pelos oceanos (HARRIS et al., 2021).

A operação convencional de plantio de macaúba consorciada com pastagens contribui com a melhoria de pastagens, eventualmente tirando-as do status de pastagens degradadas (PIMENTEL et BARBOSA, 2022), através da adubação e da retirada do gado durante o período de 4 anos até o estabelecimento inicial do plantio. Isso, por sua vez, pode aumentar a produtividade de pastagens, eventualmente reduzindo a pressão por desmatamento para abertura de novas pastagens substitutas das pastagens degradadas subutilizadas. Nesse sentido e considerando uma política de comando e controle que elimine o desmatamento ilegal na Amazônia, tal redução na pressão de desmatamento pode contribuir para um maior sequestro de carbono com o crescimento de florestas secundárias na Amazônia (HEINRICH et al., 2021).

Portanto, o plantio de macaúba consorciado a pastagens e possíveis áreas degradadas em sua área adequada atual pode levar à recuperação de mais de 21 milhões de hectares, o que excederia em 141% a demanda dos 15 milhões de hectares da iNDC (Intended Nationally Determined Contribution) brasileira referentes à recuperação de pastagens. Além da contribuição direta pelo poderoso sequestro de carbono em si, tem-se a possível contribuição indireta da macaúba à descarbonização da economia brasileira e global através da produção de biocombustíveis. Plantios bem

manejados de macaúba podem superar a produtividade de óleo por área quando comparados à palma africana, o que a torna uma perfeita substituta da mesma na faixa edafoclimática extratropical (COLOMBO et al., 2018).

Considerando as mesmas condições de cultivo e a mesma área, é possível alcançar a produção de 105 bilhões de litros anuais de óleo refinável, nos principais combustíveis utilizados no transporte global, incluindo querosene de aviação. Tal quantitativo considera uma produção média de 5000 litros de óleo por hectare. Segundo a BP (British Petrol) (RITCHIE et al., 2022), o consumo global dos referidos combustíveis foi de 3,2 trilhões de litros de combustível em 2019, dos quais 2,6% podem ser substituídos por biocombustíveis a partir de óleo de macaúba. No nível do Brasil, segundo a ANP (2021), foram consumidos 128 bilhões de litros de combustível entre gasolina, diesel e querosene de aviação em 2020. Com os 105 bilhões de óleo refinável, poder-se-ia atender 82% da demanda brasileira por esses combustíveis. Dessa forma, boa parte dos 422 milhões de toneladas de CO₂eq. emitidos pela queima de combustíveis fósseis no Brasil em 2016 (MCT 2020) poderiam deixar de ser emitidos, contribuindo com a substituição por biocombustíveis oriundos da macaúba. Tal valor equivale a 0,7% das emissões globais para 2019.

4.11 CONCLUSÕES

A hipótese sobre a resiliência da macaúba frente às mudanças climáticas se confirmou através de nossos modelos, demonstrando-se como uma excelente alternativa ecológica e econômica para o Brasil alcançar as metas de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) estabelecidas pela NDC.

O resultado demonstrou pequenas perdas de áreas adequadas, que podem ser consideradas inexpressivas, especialmente frente às expansões projetadas para o futuro. Essa previsibilidade pode trazer maior segurança a possíveis investimentos na magnitude aqui sugerida, visto que são previstos ciclos de exploração de um plantio de macaúba por pelo menos 30 anos, especialmente em modelos agroflorestais simplificados como o proposto.

A produção consorciada de macaúba com pastagens apresenta-se como uma eficiente e promissora solução para a produção de bioenergia e alimentos sem competição por áreas. Tal modelo produtivo é corroborado por diversas propostas para ações de resiliência da sociedade às mudanças no clima. Nesse estudo, não foram consideradas áreas de expansão para macaúba no futuro quando abordamos plantios em áreas de pastagens consolidadas; contudo, demonstramos que muitas áreas se apresentam, nos modelos, como propícias para os plantios no futuro. A utilização de pastagens para o consorciamento com macaúba em áreas de expansão da adequabilidade da espécie no futuro pode aumentar ainda mais a contribuição do Brasil para o sequestro e redução da emissão de gases do efeito estufa em nível nacional e global.

Os plantios comerciais de macaúba no Brasil ainda são incipientes, mas prosseguem avançando. Desafios como financiamento da implantação da cultura, incluindo a remuneração pela retirada de gado nos anos iniciais do plantio, assim como o avanço da domesticação em busca de maior produtividade, ainda precisam ser superados. Uma possibilidade que deve ser considerada para essa superação é a aplicação de manejos sintrópicos. Tal abordagem pode se adequar bem a pequenos produtores, mas também pode ser considerada em larga escala.

O estudo contribuiu com o fortalecimento da cadeia produtiva da macaúba, especialmente ao lançar luz a partir dos modelos sobre os reduzidos riscos para o estabelecimento da cultura em áreas adequadas atuais, as quais tenderão a se manter adequadas de acordo com nossas previsões.

4.12 REFERÊNCIAS

ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021.

BARROS-ROSA, Lucas *et al.* Fire probability mapping and prediction from environmental data: What a comprehensive savanna-forest transition can tell us. **Forest Ecology and Management** v. 520, p. 120354 , set. 2022.

BERTON, Luiz Henrique Chorfi; DE AZEVEDO FILHO, Joaquim Adelino; LIMONTA, Cássia Regina. SELEÇÃO DE MATRIZES DE MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*) PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL. 2013, Ribeirão Preto: [s.n.], 2013.

BICALHO, Elisa Monteze *et al.* Do the structures of macaw palm fruit protect seeds in a fire-prone environment? **Acta Botanica Brasilica** v. 30, n. 4, p. 540–548 , 2016.

CALZAVARA, A K *et al.* Morphoanatomy and ecophysiology of tree seedlings in semideciduous forest during high-light acclimation in nursery. **PHOTOSYNTHETICA** v. 53, n. 4, p. 597–608 , 2015.

CARDOSO, Alexandre *et al.* Opportunities and challenges for sustainable production of *A. aculeata* through agroforestry systems. **Industrial Crops and Products** v. 107, p. 573–580 , 2017.

COELHO, Natália Helena Pessoa *et al.* Understanding genetic diversity, spatial genetic structure, and mating system through microsatellite markers for the conservation and sustainable use of *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart. **Conservation Genetics** v. 19, n. 4, p. 879–891 , 2018.

COLLEVATTI, Rosane Garcia *et al.* Recovering the demographical history of a Brazilian Cerrado tree species *Caryocar brasiliense*: coupling ecological

niche modeling and coalescent analyses. **Natureza & Conservação** v. 10, n. 2, p. 169–176 , 2012.

COLOMBO, Carlos Augusto *et al.* Macauba: A promising tropical palm for the production of vegetable oil. **OCL - Oilseeds and fats, Crops and Lipids** v. 25, n. 1, p. D108 , 2018.

DE LIMA, Natácia Evangelista *et al.* A review of the palm genus *Acrocomia*: Neotropical green gold. **Organisms Diversity and Evolution** v. 18, n. 2, p. 151–161 , 22 jun. 2018.

EMBRAPA. *Mapa de solos do Brasil*. Disponível em:
<http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_solos_5m_20201104>.

FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology** v. 37, n. 12, p. 4302–4315 , out. 2017.

GUNN, Bee F. The phylogeny of the Cocoeae (Arecaceae) with emphasis on *Cocos nucifera*. **Annals of the Missouri Botanical Garden** v. 91, n. 3, p. 505–522 , 2004.

HEINRICH, Viola H. A. *et al.* Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. **Nature Communications** v. 12, n. 1, p. 1785 , 19 mar. 2021.

HENDERSON, Alec F.; SANTORO, Jennifer A.; KREMER, Peleg. Ensemble modeling for American chestnut distribution: Locating potential restoration sites in Pennsylvania. **Frontiers in Ecology and Evolution** v. 10 , 10 ago. 2022.

IBGE. **Biomass e Sistema Costeiro-Marinheiro do Brasil**. Rio de Janeiro: Ministério da Economia, 2019. 168 p.

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2022. 3–33 p. (Summary for Policymakers).

LANES, Éder C.M. *et al.* Molecular characterization and population structure of the Macaw Palm, *Acrocomia aculeata* (Arecaceae), Ex Situ Germplasm collection using microsatellites markers. **Journal of Heredity** v. 106, n. 1, p. 102–112 , 2015.

LIRA-NORIEGA, Andrés; SOBERÓN, Jorge; EQUIHUA, Julián. Potential invasion of exotic ambrosia beetles *Xyleborus glabratus* and *Euwallacea* sp. in Mexico: A major threat for native and cultivated forest ecosystems. **Scientific Reports** v. 8, n. 1, p. 10179 , 5 jul. 2018.

LIU, C.; WHITE, M.; NEWELL, G. Measuring the accuracy of species distribution models: a review. 2009, Cairns: [s.n.], 2009. p.4241–4247.

MCT. **Estimativas anuais de emissões dos gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília: [s.n.], 2020.

MOTTA, Paulo Emílio Ferreira Da *et al.* Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v. 37, n. 7, p. 1023–1031 , 2002.1678-3921.

PIMENTEL, Leonardo Duarte. *Histórico da implantação de plantio comercial de macaúba* . Olaria: [s.n.] , 2020

PIMENTEL, Leonardo Duarte; BARBOSA, Maria Antônia Machado. Cultivo de macaúba em Sistemas Agroflorestais. **Informe Agropecuário** v. 43, n. 320, p. 63–75 , 2022.

PLATH, Mirco *et al.* A novel bioenergy feedstock in Latin America? Cultivation potential of *Acrocomia aculeata* under current and future climate conditions. **Biomass and Bioenergy** v. 91, p. 186–195 , 2016.

POGGIO, L *et al.* SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. **SOIL** v. 7, n. 1, p. 217–240 , 2021.

R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing* . Vienna, Austria: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. , 2022

REIS, Tiago *et al.* *Desafios e oportunidades para avançar as Contribuições Nacionais no setor agropecuário e de florestas na América Latina: O caso do Brasil* . Manaus, Brasil: IPAM. , 2017

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max; ROSADO, Pablo. Energy. **Our World in Data** , 2022.

ROSA, Bruno Luan; SOUZA, João Paulo; PEREIRA, Eduardo Gusmão. Increased atmospheric co2 changes the photosynthetic responses of *acrocomia aculeata* (Arecaceae) to drought. **Acta Botanica Brasilica** v. 33, n. 3, p. 486–497 , 2019.

SARAIVA, Daniel Dutra *et al.* Distribution shifts, potential refugia, and the performance of protected areas under climate change in the Araucaria moist forests ecoregion. **Applied Vegetation Science** v. 24, n. 4 , 13 out. 2021.

SOUZA, Carlos M. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing** v. 12, n. 17, p. 2735 , 25 ago. 2020.

SOUZA, Carlos M. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing** v. 12, n. 17, p. 2735 , 25 ago. 2020.

VIJAY, Varsha *et al.* The Impacts of Oil Palm on Recent Deforestation and Biodiversity Loss. **PLOS ONE** v. 11, n. 7, p. e0159668 , 27 jul. 2016.

WATTEYN, Charlotte *et al.* Vanilla distribution modeling for conservation and sustainable cultivation in a joint land sparing/sharing concept. **Ecosphere** v. 11, n. 3 , 6 mar. 2020.

5 CAPÍTULO 4 - DIVERSIDADE MICROBIANA DO SOLO DE PASTAGEM TROPICAL DECLIVOSA CONSORCIADA COM MACAÚBA (*ACROCOMIA ACULEATA*).

5.1 RESUMO

O consorciamento de pastagens com macaúba promove o melhoramento de pastagens pelo incremento da fertilidade do solo através do plantio e manejo adequado de macaúbas. Microrganismos podem atuar de forma relevante na incorporação de carbono ao solo, através de sua degradação por ações enzimáticas juntamente com o estabelecimento e manutenção da comunidade microbiana do solo. Uma forma de se avaliar essas alterações é a contagem de microrganismos através de técnicas com a utilização de fluorocromo DAPI. Além disso, a Hibridização *in Situ* Fluorescente (FISH) possibilita o reconhecimento e a contagem de táxons de interesse. Os objetivos foram: 1) verificar a densidade global de microrganismos em pastagens consorciadas e não consorciadas com macaúba; 2) verificar o papel do relevo nessas diferenças; 3) verificar as diferenças na estrutura da comunidade microbiana. A área de estudo localiza-se na Fazenda Serra Negra, município de Olaria, Minas Gerais, Brasil. As amostras de solo foram coletadas em duas localidades: uma com plantio consolidado de macaúba consorciado com pastagem de braquiária (*Urochloa* sp.) e outra somente com pastagem de braquiária. Foram estabelecidos pontos de coleta no topo do morro, na encosta e na baixada. As amostras foram pesadas, acondicionada em tubo para microcentrífuga ao qual adicionou-se solução de paraformaldeído às quais foram sonicadas, diluídas em água ultrapura e centrifugadas, filtradas à vácuo em filtros de policarbonato com 0,22 micrômetros de poro. O conteúdo foi filtrado em dispositivo de filtração. Os filtros de membrana foram fracionados e postos para hibridização, mergulhados em solução de DAPI, acondicionados sobre lâmina a qual foi recoberta por lamínula e devidamente identificada. As

lâminas foram analisadas ao microscópio ótico de epifluorescência com objetiva de imersão a 100X. Aplicou-se teste Kruskal-Wallis e Mann-Whitney além de análise de componentes principais (PCA). A densidade média total de microrganismos observada foi de 1.126×10^8 cél/g, sendo 1.382×10^8 cél/g em pastagens consorciadas com macaúba e 0.870×10^8 cél/g (± 0.757) em pastagens não consorciadas. As sondas selecionadas captaram respectivamente 8% e 9% do quantitativo total de microrganismos do solo em pastagens consorciadas com macaúba e pastagens não consorciadas. O maior valor de diversidade e equabilidade foi em pastagens não consorciadas em topo de morro, seguida de pastagem consorciada com macaúba em baixada. O menor valor de diversidade e equabilidade obtido foi em pastagem não consorciada em encosta. A análise de componentes principais (PCA) revelou a formação de três grupos distintos: um formado pelas unidades amostrais em pastagens consorciadas em baixada e topo de morro, outro formado por unidades amostrais em pastagem consorciada em encosta e um o terceiro formado por unidades amostrais em pastagens não consorciadas. De maneira geral, pastagens consorciadas com macaúba apresentaram maior densidade de microrganismos no solo. Os resultados apontaram para uma melhoria nas condições ambientais do solo para a comunidade microbiana quando comparamos a comunidade de ambientes com pastagem consorciada com macaúba com aquela de ambientes com pastagem solteira. O relevo importa na estrutura da comunidade microbiológica, onde encostas, especialmente em pastagem não consorciada, se demonstram o ambiente com maior fragilidade ambiental para a comunidade microbiológica.

Palavras-chave: macaúba; FISH; diversidade microbiana; microbiologia do solo.

5.2 ABSTRACT

The intercropping of pastures with macauba promotes the improvement of pastures by increasing soil fertility through the planting and proper management of macauba trees. Microorganisms can play an important role in the incorporation of carbon into the soil, through its degradation by enzymatic actions together with the establishment and maintenance of the soil's microbial community. One method for assessing these changes involves counting microorganisms using DAPI fluorochrome techniques. Fluorescent In Situ Hybridization (FISH) also makes it possible to recognize and count taxa of interest. The objectives were as follows: 1) to determine the overall density of microorganisms in pastures intercropped with macauba compared to non-intercropped pastures; 2) to assess the influence of relief on these differences; 3) to examine differences in the structure of the microbial community. The study area is located at Fazenda Serra Negra, in the municipality of Olaria, Minas Gerais, Brazil. Soil samples were collected from two locations: one with a consolidated macauba plantation combined with brachiaria pasture (*Urochloa* sp.) and the other with brachiaria pasture only. Collection points were established at the top of the hill, on the slope and in the lowlands. The samples were weighed, placed in a microcentrifuge tube containing paraformaldehyde solution, sonicated, diluted in ultrapure water, centrifuged, and vacuum-filtered through polycarbonate filters with a pore size of 0.22 micrometers. The contents were filtered through a filtration device. The membrane filters were fractionated and placed for hybridization, dipped in a DAPI solution, and placed on a slide that was covered with a coverslip and duly identified. The slides were analyzed using an optical epifluorescence microscope with a 100X immersion objective. Kruskal-Wallis and Mann-Whitney tests were applied, as well as principal component analysis (PCA). The average total density of microorganisms observed was $1,126 \cdot 10^8$ cell/g, with $1,382 \cdot 10^8$ cell/g in pastures intercropped with macauba and $0,870 \cdot 10^8$ cell/g ($\pm 0,757$) in uncropped pastures. The probes selected captured 8% and 9% respectively of the total quantity of soil microorganisms

in pastures intercropped with macauba and non-intercropped pastures. The highest values of diversity and evenness were found in non-cropped pastures on hilltops, followed by macauba-intercropped pastures in lowland areas. The lowest values for diversity and evenness were found in non-cropped pastures on hillsides. Principal component analysis (PCA) revealed the formation of three distinct groups: one made up of sample units in lowland and hilltop intercropped pastures, another made up of sample units in hillside intercropped pastures, and a third made up of sample units in non-intercropped pastures. In general, pastures intercropped with macauba had a higher density of microorganisms in the soil. The results point to an improvement in the soil's environmental conditions for the microbial community when comparing the community of environments with pastures intercropped with macauba with those of environments with single pastures. Relief plays a significant role in the structure of the microbiological community, with slopes, particularly in non-intercropped pastures, being the most fragile environments for the microbiological community.

Keywords: macaúba; FISH; microbial diversity; soil microbiology.

5.3 INTRODUÇÃO

Há consenso de que os métodos convencionais de produção agropecuária podem levar à degradação do solo por práticas como: redução da cobertura vegetal de solos cultiváveis, aragem contínua, uso desbalanceado de fertilizantes minerais e pastejo extensivo mal manejado (ARAUJO et al., 2012). Isso se agrava em solos tropicais, onde fenômenos como a lixiviação removem particulados do solo a partir de chuvas intensas, potencializados por relevos acidentados onde ocorrem níveis acentuados de escoamento superficial de águas pluviais (CORRÊA et al., 2018). Métodos de produção relacionados aos agroflorestais podem trazer grandes benefícios na conservação de solos a partir do constante incremento de matéria orgânica ao solo, reduzindo o uso de fertilizantes minerais e promovendo o aumento da produtividade por área (MATOS et al., 2022). Pastagens brasileiras têm sofrido deterioração por práticas inadequadas de manejo, associadas à instalação das mesmas em relevos com grandes inclinações (SELIGER et al., 2019). Tal prática pode ter relação com o uso do solo para pastagens, que substituíram culturas agrícolas progressas não conservativas do solo, como a do café cultivado de maneira convencional (HARVEY et al., 2021). Tal situação tem levado a um empobrecimento de algumas regiões brasileiras, como é o caso da Zona da Mata de Minas Gerais (FARIA et al., 2022).

Uma possibilidade para a retomada econômica de regiões com histórico de uso alternativo do solo é o consorciamento de pastagens com macaúba (*Acrocomia aculeata* - Arecaceae). A macaúba é uma palmeira nativa do Brasil que pode ser altamente produtiva em óleos vegetais, sendo considerada uma sucedânea da palma africana (*Elaeis guineensis*), superando-a em diversos aspectos (EVARISTO et al., 2016). A macaúba pode ser consorciada com diversas culturas agrícolas, incluindo pastagens. Isso supera o paradigma da competição por áreas agricultáveis nas demandas por produção de energia ou alimentos (LIMA et al., 2018). Além disso, o consorciamento de pastagens com macaúba promove o melhoramento de pastagens pelo incremento da fertilidade do solo através do plantio e manejo adequado de macaúbas (PIMENTEL et BARBOSA, 2023).

Ao se considerar melhores práticas de manejo do solo, o papel dos microrganismos como indicadores de importantes aspectos do solo é relevante. Eles são responsáveis por funcionalidades do solo necessárias ao desenvolvimento vegetal, como a mineralização e disponibilização de nutrientes (SIKORSKI, 2015), além de interações microrganismo-planta ao nível da rizosfera, promovendo a saúde vegetal (XIONG et al., 2020). Dentre os diversos papéis que a microbiota do solo pode desempenhar, um relevante e relativamente bem conhecido é a disponibilização de nutrientes, especialmente nitrogênio, que é crucial para o desenvolvimento de organismos em geral (XU et al., 2020). Além disso, os microrganismos podem atuar de forma relevante na incorporação de carbono ao solo, através de sua degradação por ações enzimáticas, juntamente ao estabelecimento e manutenção da comunidade microbiana do solo (PRESCOTT et VESTERDAL, 2021).

O acréscimo de matéria orgânica aos solos agrícolas pode melhorar as condições ambientais favoráveis aos microrganismos, alterando a biomassa dos mesmos, assim como a estrutura e composição de suas comunidades. Uma forma de se avaliar essas alterações é a contagem de microrganismos através de técnicas com a utilização de fluorocromo DAPI (4'6-diamidino-2-fenilindol). Além disso, a utilização de sondas associadas a sequências curtas de RNA que expressem táxons de interesse através da Hibridização in Situ Fluorescente (FISH) possibilita o reconhecimento desses táxons, juntamente com sua contabilização. Isso permite a comparação de quantitativos desses táxons em diferentes situações, de modo a expressar diferenças ou semelhanças entre elas. Essa técnica é particularmente útil para o reconhecimento de unidades taxonômicas em ambiente recalcitrante como o solo, onde há muitos procariontos não cultiváveis (CARDOSO & ANDREOTE, 2020).

A viabilidade técnica e ecológica da produção agrosilvopastoril com macaúba pode ser observada a partir de MOREIRA et al. (2020) e CARDOSO et al. (2017). Vários aspectos sobre a ecologia da macaúba têm sido estudados, incluindo sua utilização em agroflorestas (conferir capítulo 1), mas nada foi encontrado sobre a estrutura e diversidade de procariontes do solo em agroflorestas com macaúba.

Dessa forma, os objetivos foram: 1) verificar a diferença na densidade global de microrganismos em pastagens consorciadas e não consorciadas com macaúba; 2) verificar se o relevo também pode contribuir para essas diferenças; 3) verificar a diferença na estrutura da comunidade microbiana do solo nesses dois tipos de cobertura vegetal agropecuária.

A hipótese foi que o acréscimo de matéria orgânica às pastagens a partir do consorciamento com macaúba traz melhoria à comunidade microbiana do solo, aumentando sua abundância global e melhorando os aspectos de sua biodiversidade.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

Apresentam-se a seguir as etapas metodológicas para o desenvolvimento desse estudo.

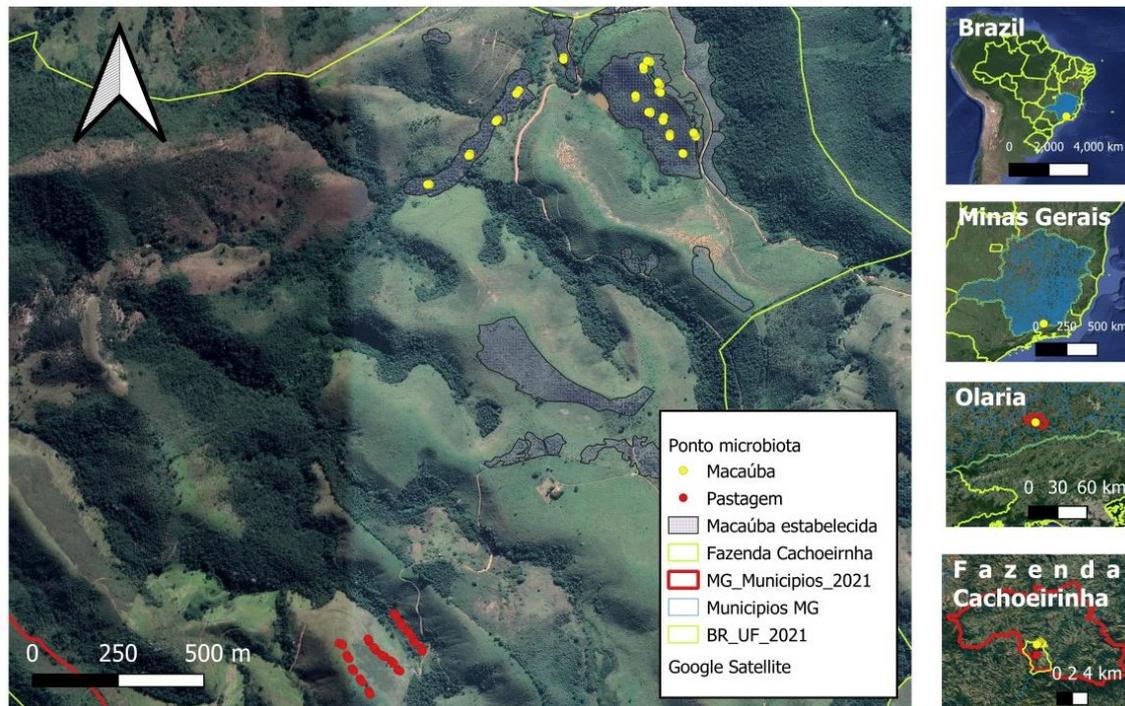
5.4.1 Área de estudos

A Fazenda Serra Negra (antiga Fazenda Cachoeirinha) localiza-se no município de Olaria, na Zona da Mata de Minas Gerais (Figura 8). O município está no domínio do bioma Mata Atlântica, com predominância de floresta estacional semidecidual como fitofisionomia natural remanescente (PESSOA et al., 2022). O relevo predominante é do tipo mares de morro, com altitudes variando entre 750 e 1220 metros acima do nível do mar. O clima é do tipo Cwb de Koppen (ou clima mesotérmico), com estação seca e fria bem definida durante os meses intermediários do ano e verões chuvosos (MOREIRA et CARVALHO, 2013).

A fazenda Serra Negra tem 1118,3 hectares, dos quais 477,9 hectares (43%) são cobertos por Floresta Estacional Semidecidual. Nos 443,2 hectares de pastagem ocorrem 24,4 hectares de plantio comercial de

macaúba consorciados com pastagem de braquiária (*Urochloa* sp), sendo pioneira no plantio comercial de macaúba.

Figura 8 - Mapa de localização da Fazenda Serra Negra e das unidades amostrais desse estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

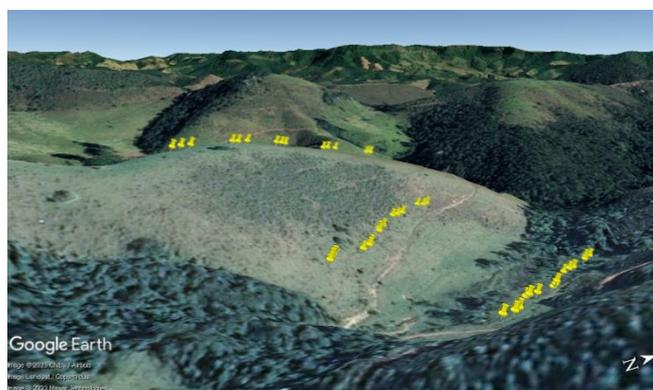
5.4.2 Coleta de amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas em duas localidades: uma com plantio consolidado de macaúba consorciado com pastagem de braquiária (*Urochloa* sp.) e outra somente com pastagem de braquiária. A distribuição dos pontos de coleta foi estabelecida de forma estratificada em cada uma das situações, de modo a captar a variação do relevo. Foram estabelecidos pontos de coleta no topo do morro, na encosta e na baixada (Figura 9). Em cada um dos diferentes tipos de relevo foram estabelecidas cinco unidades amostrais, onde foram selecionados três pontos de coleta de amostras de solo. Os pontos de coleta em pastagens consorciadas com macaúba foram

definidos logo ao lado de indivíduos de macaúba equidistantes a cinco metros. No caso das pastagens não consorciadas, manteve-se a equidistância de cinco metros entre os pontos de coleta. Totalizaram-se dois conjuntos de 45 pontos de coleta para cada situação de cobertura de solo, em um total geral de 90 amostras de solo.

Para a retirada de amostras de solo, foram abertas pequenas trincheiras de aproximadamente 20 cm de profundidade. Na lateral interna de cada trincheira, localizou-se a camada de solo entre 5 e 10 cm de profundidade, de onde retiraram-se torrões de aproximadamente 10 gramas de solo com o auxílio de uma pá de jardinagem, a qual foi devidamente higienizada após cada retirada. As amostras foram acondicionadas em sacolas plásticas devidamente identificadas e enviadas no mesmo dia para refrigeração. Foram registradas as coordenadas geográficas de cada ponto de coleta com o auxílio de um GPS de navegação com até cinco metros de raio de erro (Tabela 15 - Apêndice C).

Figura 9 - Distribuição de unidades amostrais em pastagem não consorciada ilustrando a distribuição das unidades amostrais de maneira estratificada no relevo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.4.3 Seleção de sondas FISH

O critério para seleção dos grupos taxonômicos dos microrganismos utilizados neste estudo foram baseados em sua capacidade de ciclagem e mineralização de nutrientes no solo (Tabela 9).

Tabela 9 - Relação das sondas FISH utilizadas na avaliação da microbiota do solo em pastagens consorciadas com macaúba e pastagens não consorciadas.

Probe	Target	Sequence	Reference
ACIDO228	Acidobacteria subdivision 1 16S rRNA, position 210-228	5'- TAA TCD GCC GCG AMC YCC T -3'	Kleinsteuber et al. 2007
BET42a	Betaproteobacteria 23S rRNA, position 1027-1043	5'- GCC TTC CCA CTT CGT TT -3'	Manz et al. 1992
EURY498	most Euryarchaeota 16S rRNA, position 498-511	5'- CTT GCC CRG CCC TT -3'	Burggraf et al. 1994
FUN1429	Fungi 18S rRNA, position ???	5'- GTG ATG TAC TCG CTG GCC -3'	Baschien et al. 2001
GAM42a	Gammaproteobacteria 23S rRNA, position 1027-1043	5'-GCC TTC CCA CTT CGT TT -3'	Yeates et al. 2003
NIT3	Nitrobacter spp. 16S rRNA, position 1035-1052	5'- CCT GTG CTC CAT GCT CCG -3'	Lopes et al. 2015
Ntspa685	Nitrospira moscoviensis, Nitrospira marina and 710-9 clone 16S rRNA, position 664-685	5'- CAC CGG GAA TTC CGC GCT CCT C -3'	Hovanec et al. 1998

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.4.4 Procedimentos laboratoriais

Apresentam-se a seguir os procedimentos laboratoriais que descrevem essa etapa da metodologia.

5.4.4.1 *Preparação da amostra*

Foi separada e pesada uma fração de 0,5 g de cada amostra de solo em uma balança de precisão. Cada fração foi acondicionada em um tubo para microcentrifuga devidamente identificado. Em seguida, foi adicionado 1,5 ml de solução de paraformaldeído (PFA) a 2% ao tubo para fixação das amostras. Cada amostra foi transferida para um tubo falcon, ao qual foram adicionados mais 3 ml de PFA à solução anterior. Os tubos falcon contendo 5 ml de solução foram imersos em gelo e levados para sonicação a 90% de amplitude com pulsos de 60 segundos e intervalo de 60 segundos por três vezes. À solução sonicada foram adicionados 5 ml de água ultrapura. Essa solução diluída foi levada à centrifuga a 500G por cinco minutos. Em seguida, adicionou-se mais 5 ml de água ultrapura e repetiu-se a centrifugação, sendo posteriormente adicionado mais 5 ml de água ultrapura, centrifugando-se a solução pela última vez. Uma fração de 2 ml dessa solução foi reservada da parte superior do tubo falcon para salvaguarda de eventuais perdas no restante do processo de preparação de amostras. Outra fração de 1 ml foi depositada sobre um filtro de policarbonato com 0,22 micrômetros de poro. O conteúdo foi filtrado em um dispositivo de filtração a vácuo até que todo o líquido fosse removido. Os filtros de policarbonato devidamente preparados foram levados para tubos de microcentrifuga devidamente identificados.

Os filtros de membrana foram fracionados com auxílio de tesoura e devidamente posicionados sobre papel filtro (Whatman) em partes devidamente numeradas. Lâminas recobertas com parafilme foram

preparadas previamente para a incubação dos fragmentos de filtro. Foram adicionados 40 microlitros de solução de sonda a 20%, 30%, 35% e 40%, dependendo da sonda a ser utilizada, sobre a lâmina com parafilme. Cada gota de solução foi posicionada em uma posição específica da lâmina de parafilme para evitar confusão sobre as sondas a serem hibridizadas. Os pedaços de filtro de cada amostra, referentes às diferentes sondas, foram mergulhados em cada gota de solução de sonda. As lâminas com solução de sonda foram acondicionadas em tubos falcon devidamente preparados com papel toalha embebido em solução de hibridização nas concentrações de 20%, 30%, 35% e 40%, dependendo da sonda a ser hibridizada. Os tubos foram devidamente fechados e levados para uma estufa a 42 °C por aproximadamente 12 horas. As lâminas foram retiradas dos tubos para hibridização, e cada pedaço de filtro foi mergulhado em tubos para microcentrífuga contendo solução de lavagem. Estes foram incubados a 48 °C por 15 minutos. Em seguida, os pedaços de filtro foram mergulhados em solução de DAPI, devidamente acondicionados em tubos para microcentrífuga, por 3 minutos. Os pedaços de filtro foram mergulhados em álcool etílico a 80% por três vezes. Cada pedaço de filtro foi recolocado sobre papel filtro (Whatman) devidamente numerado em sua posição original até que secasse. Os pedaços de filtro corados com DAPI e hibridizados com suas respectivas sondas foram acondicionados sobre lâmina. Cada filtro foi posicionado de forma que se tivesse certeza de qual posição na lâmina correspondia a qual sonda. A lâmina foi recoberta por lamínula e devidamente etiquetada com a numeração original da amostra.

5.4.4.2 Contagem de microorganismos

As lâminas foram levadas ao microscópio óptico de epifluorescência (Olympus IX-71) com objetiva de imersão a 100X. Procedeu-se à contagem de 10 grades com 10 micrômetros de aresta de cada unidade da grade. Tal contagem foi realizada para cada sonda, assim como para o DAPI. Utilizou-

se sonda non-sense (vazia - sequência aleatória de nucleotídeos) para neutralizar o efeito da contagem de artefatos que não correspondessem à sonda aplicada.

5.4.5 Estatística

Foi aplicado o teste de Levene aos dados, os quais revelaram-se sem normalidade. A partir daí, aplicou-se o teste Kruskal-Wallis para verificar a diferença entre o total de microorganismos entre pastagens consorciadas e pastagens não consorciadas. Aplicou-se o teste de Mann-Whitney para verificar a diferença entre o total de microorganismos nas diferentes situações de relevo (topo de morro, encosta e baixada) e nas diferentes coberturas vegetais (pastagens consorciadas e não consorciadas). Procedeu-se com a análise de componentes principais (PCA) para avaliar correlações entre a comunidade microbiana selecionada e parâmetros da vegetação consorciada, incluindo número de indivíduos de palmeiras e carbono por hectare de cada unidade amostral. Utilizou-se a posição no relevo e as faixas de inclinação como variáveis quantitativas suplementares. Utilizou-se a média das densidades dos táxons selecionados e da densidade global de microorganismos, visto que foram coletadas três amostras para análise microbiológica em cada parcela do inventário de carbono.

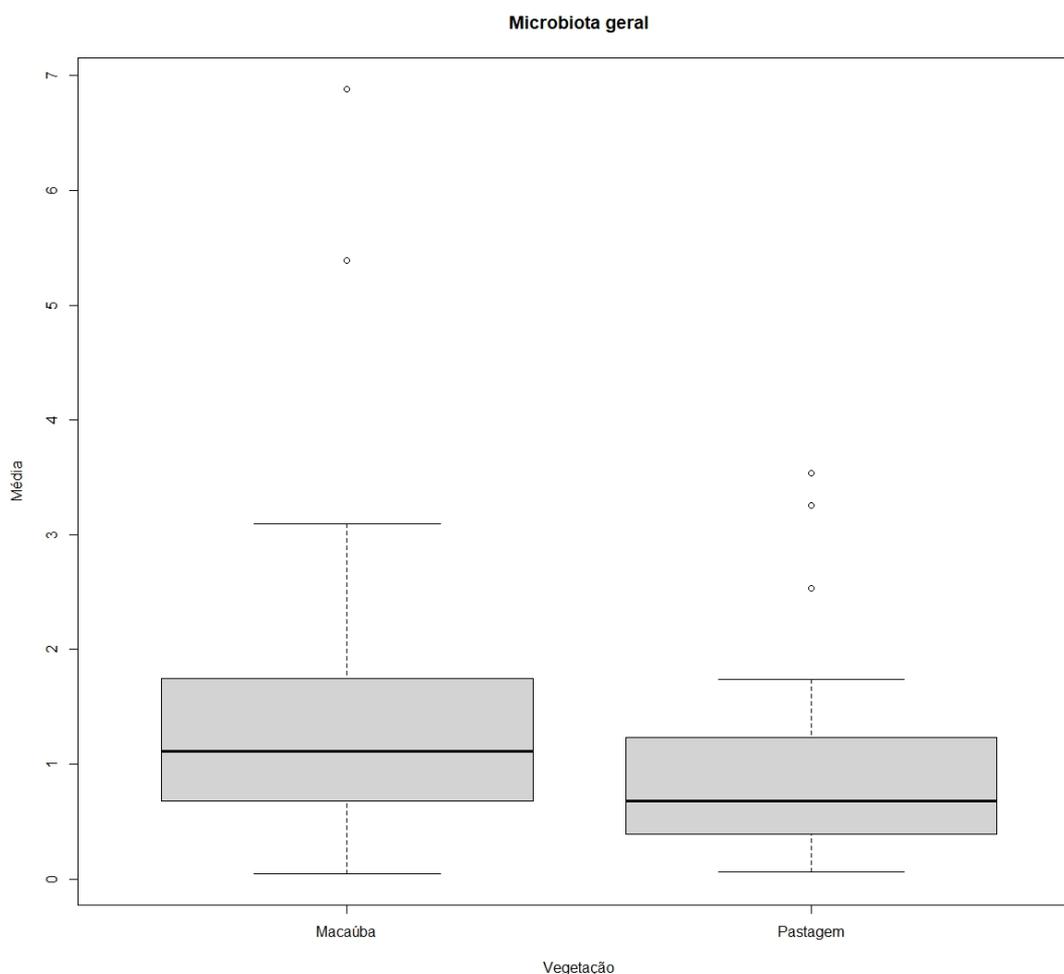
5.5 RESULTADOS

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos nesse estudo.

5.5.1 Densidade total de procariotos e fungos

A densidade média total de microrganismos (arqueias, bactérias e fungos) observada foi de 1.126×10^8 cél/g (± 1.063). Foi observada uma densidade média de 1.382×10^8 cél/g (± 1.256) em pastagens consorciadas com macaúba e uma densidade média de 0.870×10^8 cél/g (± 0.757) em pastagens não consorciadas. Foi verificada diferença estatística significativa entre os dois conjuntos de amostras ($P < 0,0001315$) (Tabela 10).

Figura 10 - Densidade média de microrganismos (arqueia, bactérias) nos diferentes tipos de vegetação (pastagens consorciada - macaúba; pastagens não consorciadas - pastagem)

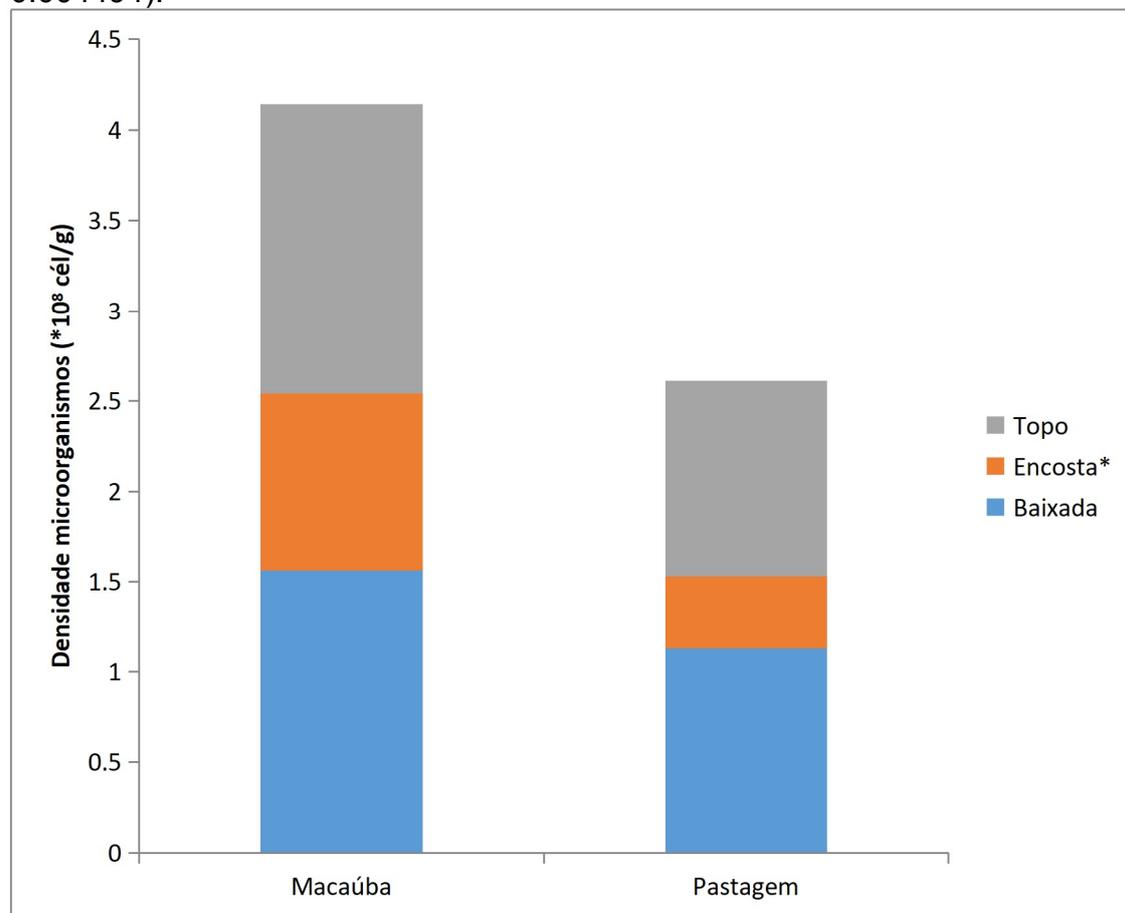


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Comparando as densidades de microrganismos para cada classe de vegetação em suas diferentes posições no relevo, observam-se diferenças estatísticas significativas em algumas situações. O conjunto de amostras observado para encostas em pastagens não consorciadas foi diferente das demais categorias. Nesse caso foi onde se obtiveram os menores valores de densidade de microrganismos por grama de solo.

Também se observou diferença significativa entre amostras em topo de morro de pastagem consorciada com macaúba e baixada em pastagens não consorciadas. Além disso, foi observada diferença significativa entre as amostras de pastagens consorciadas com macaúba em topo de morro e pastagens consorciadas com macaúba em encostas (Figura 11; Tabela 10).

Figura 11 - Quantitativo global de microrganismos (arquea, bactérias) separados por tipo de vegetação (pastagens consorciadas com macaúba e não consorciadas) e tipos de relevo (topo de morro, encosta e baixada) (tipos de relevo com * apresentaram diferença estatística significativa quando comparados dois a dois entre os tipos de vegetação - Kruskal-Wallis. $P < 0.004494$).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 10 - Valor de teste Mann-Whitney comparando-se o quantitativo global de microrganismos entre diferentes tipos de vegetação e de relevo onde: M(B) = Pastagens consorciadas com macaúba em baixada; M(E) = Pastagens consorciadas com macaúba em encosta; M(M) = Pastagens consorciadas com macaúba em topo de morro; P(B) = Pastagens não consorciadas em baixada; P(E) = Pastagens não consorciadas em encosta; P(M) = Pastagens não consorciadas em topo de morro. Valores em itálico representam diferenças estatísticas significativas.

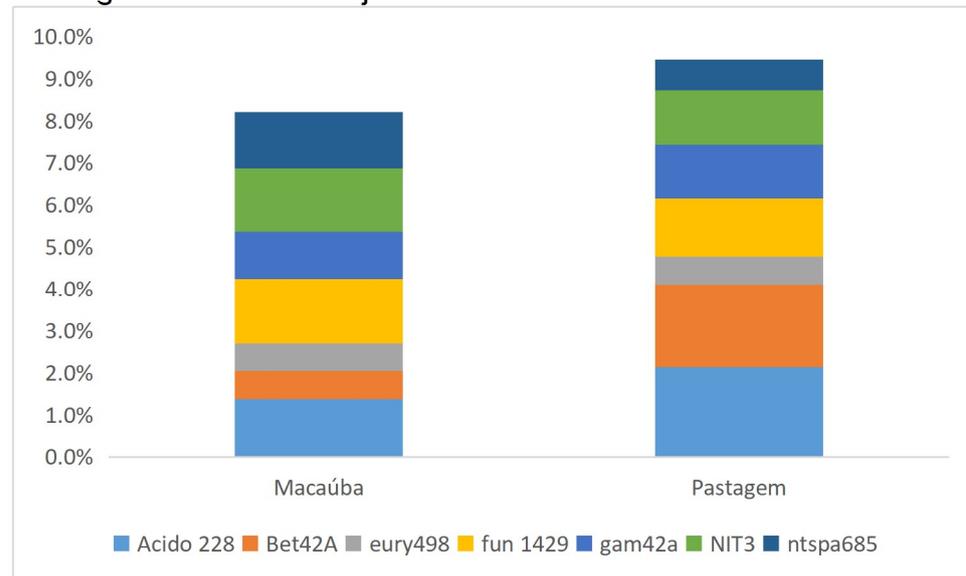
	M(B)	M(E)	M(M)	P(M)	P(E)	P(B)
M(B)		0.8682	0.0745	0.5614	<i>0.002463</i>	0.9339
M(E)	0.8682		<i>0.0344</i>	0.74	<i>0.004795</i>	0.7557
M(M)	0.0745	<i>0.0344</i>		0.08902	<i>1.33E-05</i>	<i>0.04211</i>
P(M)	0.5614	0.74	0.08902		<i>0.0002622</i>	0.3951
P(E)	<i>0.002463</i>	<i>0.004795</i>	<i>1.33E-05</i>	<i>0.0002622</i>		<i>0.005109</i>
P(B)	0.9339	0.7557	<i>0.04211</i>	0.3951	<i>0.005109</i>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

5.5.2 Densidade de arquea bactérias e fungos

As sondas selecionadas captaram respectivamente 8% e 9% do quantitativo total de microrganismos do solo em pastagens consorciadas com macaúba e pastagens não consorciadas (Figura 12).

Figura 12 - Percentual de microrganismos captados pelas sondas nos diferentes tipos de vegetação (pastagens consorciadas com macaúba - “**Macaúba**” e pastagens não consorciadas - “**Pastagens**”). Para identificação das siglas dos taxons veja tabela 9.

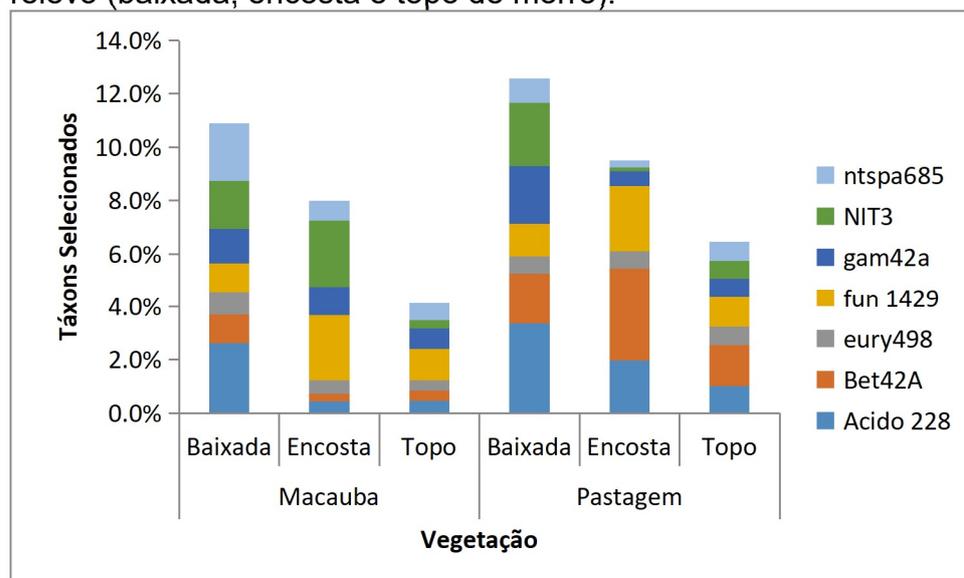


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Analisando-se o que foi captado pelas sondas em relação cômputo total de microrganismos nas diferentes partes do relevo nos diferentes tipos de vegetação observou-se (Figura 13): 1) os ambientes onde melhor se captaram os táxons selecionados foram macaúba consorciada em baixada e pastagem não consorciada em baixada; 2) os ambientes onde menos se captaram os táxons selecionados foram topo de morro em pastagem consorciada e topo de morro em pastagem não consorciada; 3) nas pastagens consorciadas em baixada, Acidobacteria e Nitrospira representam, respectivamente, 2,6% e 2,2% do total de microrganismos; 4) nas pastagens consorciadas em encosta, fungos e Nitrobacter representam 2,5% cada do total de microrganismos; 5) em pastagem consorciada em topo de morro, fungos representam 1,2% do total de microrganismos, seguidos de Gammaproteobacterias com 0,8% do total de microrganismos; 6) em pastagens não consorciadas em baixada, Acidobacteria e Nitrobacter representaram, respectivamente, 3,4% e 2,4% do total de microrganismos; 7) em pastagens não consorciadas em encosta, Betaproteobacterias e fungos representaram, respectivamente, 3,5% e 2,5% do total de microrganismos; 8)

em pastagens não consorciadas em topo de morro, Betaproteobacterias representam 1,5% do total de microrganismos, seguidas de fungos com 1,1% do total de microrganismos cada.

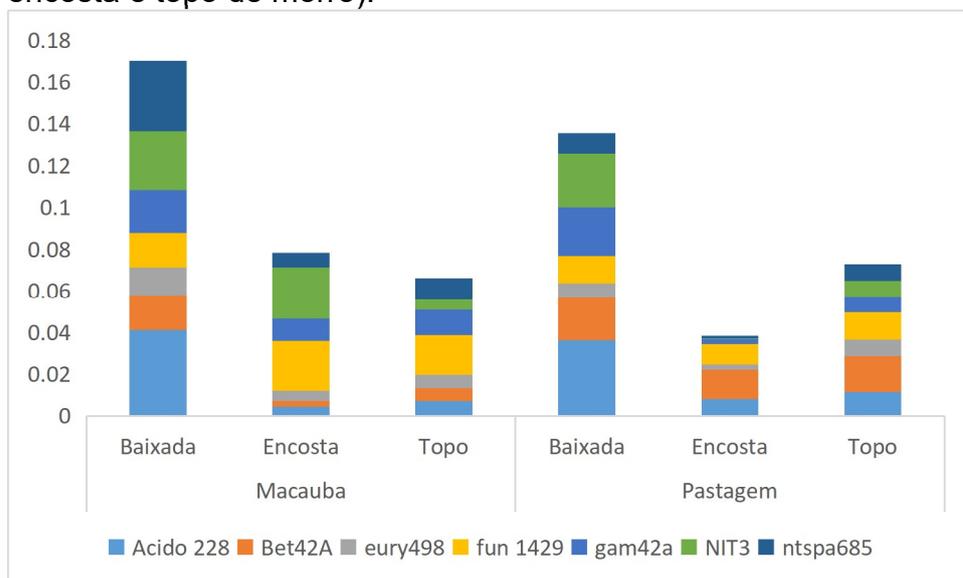
Figura 13 - Percentual de táxons captados em relação ao computo total de microrganismos nos diferentes tipos de vegetação (pastagens consorciadas com macaúba - “**Macaúba**” e pastagens não consorciadas - “**Pastagem**”) e relevo (baixada, encosta e topo de morro).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Considerando os táxons de bactérias, arqueas e fungos avaliados, observou-se que Acidobacteria foi o táxon com maior abundância em pastagem consorciada com macaúba, seguido de Nitrospira e Nitrobacter. Em pastagem consorciada com macaúba em encosta, o táxon mais abundante foi Nitrobacter, seguido de fungos e Gammaproteobacteria. Em pastagem consorciada com macaúba em topo de morro, o táxon mais abundante foi fungos, seguido de Gammaproteobacteria e Nitrospira. Em topo de morro e encosta de pastagens não consorciadas, os táxons mais abundantes foram Betaproteobacteria, seguido de fungos e Acidobacteria. Em baixada em pastagens não consorciadas, o táxon mais abundante foi Acidobacteria, seguido de Nitrobacter e Gammaproteobacteria (Figura 14).

Figura 14 - Densidade de microrganismos (10^8 cel/g) captados pelas sondas nos diferentes tipos de vegetação (pastagens consorciadas com macaúba - “**Macaúba**” e pastagens não consorciadas - “**Pastagens**”) e relevo (baixada, encosta e topo de morro).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

5.5.3 Índices de diversidade

A partir dos índices de diversidade de Shannon (H') e equabilidade de Pielou (J) para as comunidades nos seis diferentes ambientes analisados, observa-se que o maior valor de diversidade e equabilidade foi em pastagens não consorciadas em topo de morro, seguida de pastagens consorciadas com macaúba em baixada. O menor valor de diversidade e equabilidade obtido foi em pastagens não consorciadas em encosta (Figura 12).

Tabela 11 - Índices de diversidade de Shannon (nats por indivíduos) e equabilidade de Pielou nos diferentes tipos de vegetação (pastagens consorciadas com macaúba - macaúba e pastagens não consorciadas - pastagens) e relevo (baixada, encosta e topo de morro), onde H' = índice de diversidade de Shannon; J = índice de equabilidade de Pielou.

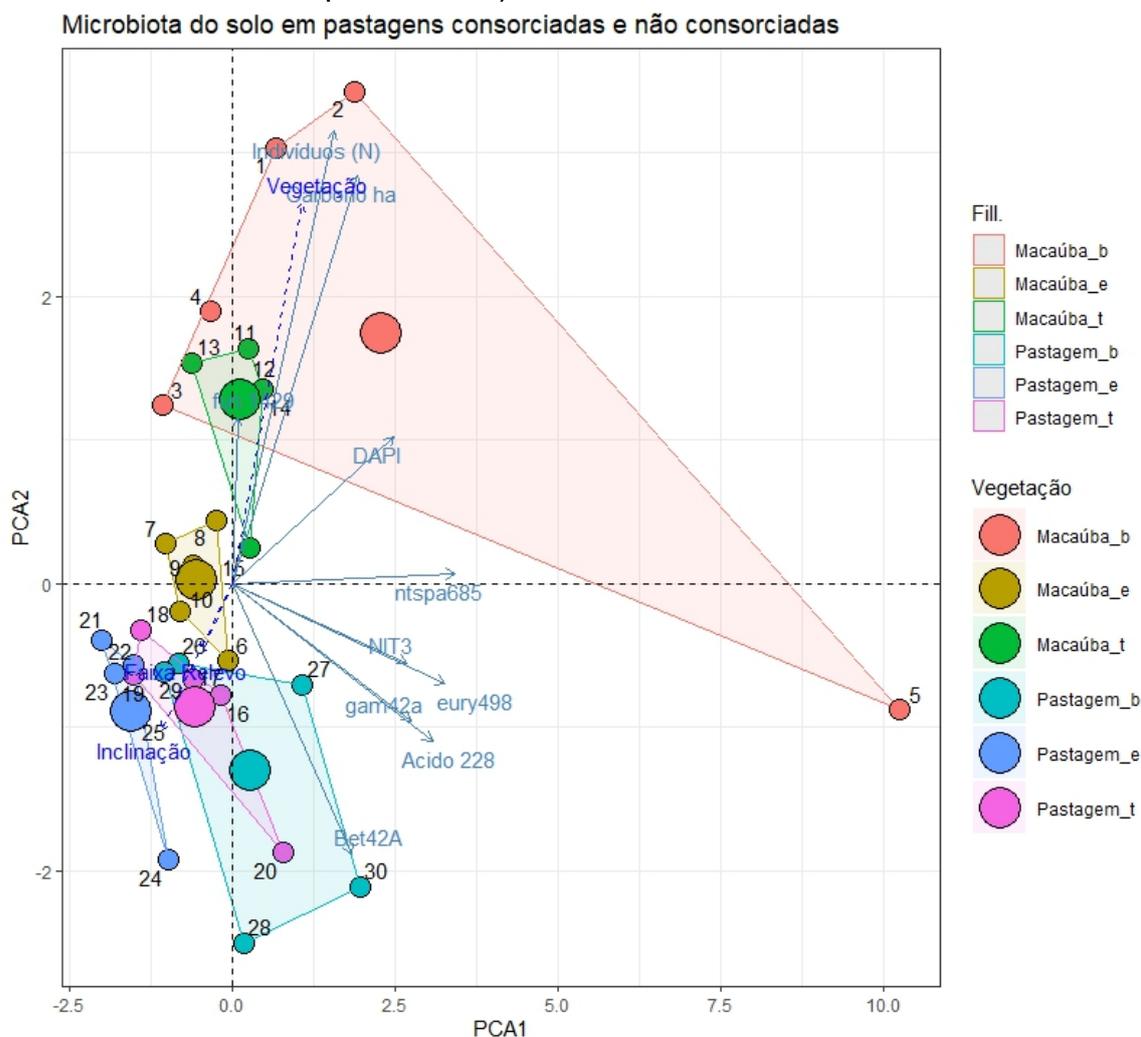
	H'		J	
	Macaúba	Pastagem	Macaúba	Pastagem
Baixada	1,87240	1,82537	0,96222	0,93806
Encosta	1,66549	1,55098	0,85589	0,79705
Topo	1,84013	1,89647	0,94564	0,97459

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

5.5.4 Correlação da estrutura da comunidade microbiana com parâmetros da cobertura de palmeiras

A análise de componentes principais (PCA) revelou a formação de três grupos distintos. O primeiro deles é formado pelas unidades amostrais em pastagens consorciadas em baixada e topo de morro. Observa-se uma grande sobreposição de conjuntos de unidades amostrais entre elas, com apenas uma amostra fora dessa sobreposição. O segundo conjunto de amostras refere-se às unidades amostrais em pastagem consorciada em encosta. Esse conjunto ficou posicionado entre o conjunto supracitado e o conjunto formado pelas demais unidades amostrais. O terceiro conjunto refere-se às unidades amostrais em pastagens não consorciadas, também com grandes sobreposições entre si (Figura 15; Tabela 12).

Figura 15 - Gráfico da PCA considerando densidade global de microrganismos, densidade de taxon selecionados, número de indivíduos de palmeiras e carbono por hectare de palmeiras (onde: macaúba_b: pastagem consorciada com macaúba em baixada; macaúba_e: pastagem consorciada com macaúba em encosta; macaúba_t: pastagem consorciada com macaúba em topo de morro; pastagem_b: pastagem não consorciada em baixada; pastagem_e: pastagem não consorciada em encosta; pastagem_t: pastagem não consorciada em topo de morro) .



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 12 - Parâmetros para análise de componentes principais

Vegetação	Vegetação	Faixa Releva	Inclinação	DAPI	Acido 228	Bet42A	eury498	fun 1429	gam42a	NIT3	ntspa685	Indivíduos (N)	Carbono ha
Macaúba_b	2	1	2	1.0429	0.0064	0.0087	0.0012	0.0169	0.0192	0.0087	0.0093	15	57047.75
Macaúba_b	2	1	1	2.9774	0.0111	0.0000	0.0029	0.0093	0.0128	0.0163	0.0308	15	53061.75
Macaúba_b	2	1	1	0.2902	0.0000	0.0006	0.0017	0.0186	0.0035	0.0023	0.0064	9	18510.75
Macaúba_b	2	1	1	0.5690	0.0029	0.0122	0.0052	0.0238	0.0035	0.0093	0.0006	10	38087
Macaúba_b	2	1	1	2.9285	0.1844	0.0634	0.0558	0.0145	0.0622	0.1041	0.1210	11	44865
Macaúba_e	2	2	3	1.1210	0.0093	0.0052	0.0099	0.0122	0.0023	0.0553	0.0052	2	1372.5
Macaúba_e	2	2	3	1.0486	0.0012	0.0000	0.0000	0.0076	0.0000	0.0215	0.0041	5	5229.5
Macaúba_e	2	2	4	0.5301	0.0017	0.0000	0.0041	0.0471	0.0244	0.0302	0.0134	4	4368.75
Macaúba_e	2	2	3	1.3989	0.0052	0.0035	0.0076	0.0111	0.0023	0.0116	0.0052	4	4338.75
Macaúba_e	2	2	3	0.8085	0.0041	0.0048	0.0032	0.0424	0.0244	0.0041	0.0076	0	0
Macaúba_t	2	3	2	2.0927	0.0070	0.0087	0.0035	0.0204	0.0151	0.0052	0.0017	10	21311.75
Macaúba_t	2	3	1	1.4851	0.0151	0.0017	0.0093	0.0174	0.0023	0.0052	0.0151	9	27198.75
Macaúba_t	2	3	1	0.9204	0.0017	0.0012	0.0017	0.0238	0.0087	0.0058	0.0029	9	21715.5
Macaúba_t	2	3	1	1.9080	0.0111	0.0134	0.0105	0.0250	0.0017	0.0052	0.0192	9	15994
Macaúba_t	2	3	1	1.5977	0.0012	0.0058	0.0064	0.0081	0.0332	0.0029	0.0128	7	6522
Pastagem_b	1	1	2	0.7417	0.0090	0.0070	0.0184	0.0213	0.0125	0.0044	0.0195	0	0
Pastagem_b	1	1	2	0.9579	0.0442	0.0000	0.0041	0.0134	0.0035	0.0064	0.0169	0	0
Pastagem_b	1	1	1	1.2650	0.0012	0.0012	0.0017	0.0116	0.0006	0.0012	0.0029	0	0
Pastagem_b	1	1	1	0.6659	0.0000	0.0052	0.0052	0.0099	0.0000	0.0023	0.0012	0	0
Pastagem_b	1	1	1	2.0127	0.0029	0.0727	0.0099	0.0087	0.0221	0.0238	0.0000	0	0
Pastagem_e	1	2	2	0.2404	0.0000	0.0000	0.0000	0.0192	0.0006	0.0006	0.0006	0	0
Pastagem_e	1	2	3	0.7879	0.0029	0.0017	0.0023	0.0093	0.0035	0.0012	0.0029	0	0
Pastagem_e	1	2	3	0.3994	0.0006	0.0000	0.0000	0.0093	0.0058	0.0012	0.0006	0	0
Pastagem_e	1	2	3	0.4141	0.0256	0.0628	0.0006	0.0023	0.0006	0.0000	0.0000	0	0
Pastagem_e	1	2	3	0.1737	0.0105	0.0058	0.0099	0.0094	0.0006	0.0000	0.0012	0	0
Pastagem_t	1	3	1	1.7302	0.0361	0.0105	0.0006	0.0111	0.0006	0.0017	0.0006	0	0
Pastagem_t	1	3	2	0.6718	0.0041	0.0041	0.0134	0.0372	0.0163	0.0872	0.0361	0	0
Pastagem_t	1	3	2	0.4300	0.0204	0.0628	0.0006	0.0000	0.0413	0.0227	0.0000	0	0
Pastagem_t	1	3	2	1.0077	0.0017	0.0000	0.0076	0.0093	0.0052	0.0134	0.0012	0	0
Pastagem_t	1	3	2	1.5566	0.1192	0.0244	0.0128	0.0087	0.0529	0.0029	0.0116	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.6 DISCUSSÃO

De maneira geral, as pastagens consorciadas com macaúba apresentaram maior densidade de microrganismos no solo, conforme esperado (RODRIGUES et al., 2015). Foram observadas variações na densidade total de microrganismos quando analisadas separadamente em função das diferentes partes do relevo e da cobertura vegetal.

As baixadas e os topos de morro apresentaram valores de densidade total próximos, os quais, apesar da diferença global, não foram significativamente diferentes quando comparados dois a dois por meio de teste de Kruskal-Wallis. Já as encostas apresentaram diferença estatística significativa, onde essa parte do relevo sem macaúba apresentou menor densidade de microrganismos.

As baixadas são reconhecidas como partes do terreno de maior fertilidade por receberem todo o aporte do carreamento de partículas orgânicas e minerais oriundos dos processos erosivos pluviais (HOOK et BURKE, 2000). Por outro lado, os topos de morro podem ser fontes de particulados a serem carreados para baixadas, os quais também são originados e carreados através das encostas. Ressalta-se que o escoamento superficial nas encostas é maior (CORREA et al., 2018; HOOK et BURKE, 2000).

Além da maior fragilidade em si dessa parte do relevo pela sua morfologia, acrescenta-se a essa fragilidade o sobrepastejo, o qual, por sua vez, compromete a cobertura vegetal contínua da pastagem, potencializando os processos erosivos e tornando assim esse ambiente menos favorável à continuidade da comunidade microbiana (Bondi et al., 2013).

Quando as densidades totais de procaríotos foram comparadas entre si dentro de cada classe de vegetação, observa-se que não há diferenças estatísticas significativas entre os diferentes tipos de relevo nas pastagens consorciadas com macaúba. Por outro lado, nas pastagens não consorciadas, as encostas tiveram valores significativamente diferentes quando

comparadas às baixadas e ao topo de morro. Isso corrobora a fragilidade ambiental desse trecho do relevo, a qual pode ser mitigada pelo complexificação ambiental através da implantação de um sistema agroflorestal silvopastoril (Palma et al., 2007).

Considerando a estrutura das comunidades em pastagens consorciadas, dentre os táxons analisados, observou-se uma mudança dos grupos com maior densidade nos diferentes tipos de vegetação e relevo. Em pastagens consorciadas em baixada, as quais podem ser consideradas como trecho com melhor qualidade ambiental, foi observado Acidobacteria e Nitrospira como grupos de maior densidade. Estes são substituídos por Nitrobacter e Fungos em encostas de pastagens consorciadas com macaúba.

Em topo de morro de pastagem consorciada com macaúba, Fungos se apresentam em primeiro lugar, seguidos de Gammaproteobacteria. No caso de Nitrospira, foi observada uma redução de mais de 70% da densidade captada em topo de morro com macaúba quando comparado a baixada com macaúba. Acidobacteria em encosta com macaúba teve uma redução de pouco menos de 90% de sua densidade quando comparada a baixada com macaúba. Nesse contexto, Nitrobacter e Fungos são os grupos dominantes em encosta com macaúba. Nitrobacter teve uma redução de sua densidade em quase 13% em encosta consorciada em comparação com baixada consorciada. Já Fungos em encosta consorciada tiveram um acréscimo de 44% de sua densidade quando comparados com fungos em baixada com macaúba. Nesse caso, pode-se sugerir uma resiliência desse grupo em encosta com macaúba quando comparado com o desempenho do mesmo em baixada com macaúba, ao passo que pode-se observar uma depleção de Acidobacteria em encosta com macaúba quando comparada com baixada com macaúba.

Em topo de morro e encosta sem macaúba, observou-se como grupos mais abundantes Betaproteobacteria e Fungos. Nesses dois tipos de relevo, os valores de densidade para esses dois grupos foram próximos entre si. Quando comparada Betaproteobacteria de baixada com macaúba e baixada sem macaúba, os valores também foram próximos, sendo um pouco menores em baixada não consorciada. No caso de Fungos em baixada com macaúba e baixada sem macaúba, observou-se uma redução da densidade de pouco

mais de 20% nas baixadas sem macaúba em relação às baixadas com macaúba.

No caso das encostas não consorciadas, aponta-se para uma resiliência de Betaproteobacteria em relação às encostas consorciadas. Observa-se também uma depleção de outros grupos em encostas não consorciadas, como Acidobacteria, Arquea e Nitrospira. Em encosta não consorciada, Nitrobacter e Gammaproteobacteria tiveram densidades 97% e 79% menores, respectivamente, do que em encosta consorciada.

Em baixada sem macaúba, foi observada uma retomada de Acidobacteria como grupo de maior densidade, com valor próximo ao observado para baixada com macaúba. Nitrobacter foi o segundo grupo com maior densidade em baixada sem macaúba. As baixadas apresentaram-se como ambientes com estrutura da comunidade microbiológica próximas entre si, o que pode estar relacionado com seu atributo enquanto depositário de particulados da erosão superficial das partes superiores do relevo.

De maneira geral, todos os ambientes apresentaram valores do índice de diversidade de Shannon (H') de 1.8 nat/ind-1 e do índice de equabilidade de Pielou (J) superiores a 0.9, oscilando seus valores na segunda casa decimal dos dois índices, com exceção de baixadas. Pastagem não consorciada em topo apresentou o maior valor de H' (1.89) e J (0.97), seguido de pastagem consorciada em baixada com H' (1.87) e J (0.96), respectivamente. Pastagem consorciada em encosta apresentou o segundo menor valor de H' (1.66) e J (0.85), ao passo que pastagem não consorciada em baixada apresentou o menor valor de H' (1.55) e J (0.79).

As unidades amostrais localizadas em pastagem em baixada e topo de morro nos dois tipos de vegetação foram responsáveis pelos maiores valores do índice de diversidade de H' e J . O segundo e o terceiro maiores valores obtidos para os dois índices foram para pastagens consorciadas e não consorciadas em baixada. Em ambos os casos, observou-se valores de equabilidade acima de 0.9, o que demonstra que para os táxons avaliados houve boa distribuição proporcional das densidades dos mesmos em relação ao conjunto analisado.

As unidades amostrais em pastagem não consorciada em encosta apresentaram os menores valores de H' e J . Tais indicadores representam

dois extremos ambientais da comunidade microbiológica avaliada, onde todos os demais ambientes apresentam-se com a melhor qualidade ambiental que encosta em pastagem não consorciada. Pode-se relacionar isso à morfologia do relevo e à dinâmica de processos erosivos pluviais em relevos acidentados, onde o escoamento superficial é mais intenso em encostas, ao passo que baixadas são receptoras do conteúdo carregado por chuvas a partir de topos de morro e encostas. Além disso, é importante mencionar a cobertura vegetal dos dois extremos, onde em baixadas consorciadas tem-se macaúbas em sua melhor expressão, tanto em densidade de indivíduos por área quanto em desenvolvimento de indivíduos (conferir capítulo 2), ao passo que em encostas não consorciadas tem-se pastagem degradada, com eventuais falhas na cobertura de capim, culminando em solo exposto e desenvolvimento de plantas ruderais (observação pessoal).

A formação dos três grupos no gráfico da PCA está relacionada com o número de indivíduos e, conseqüentemente, com a quantidade de carbono por hectare das unidades amostrais do inventário de carbono de palmeiras. Tal parâmetro contribuiu com mais de 35% da explicação da correlação na dimensão 2.

O grupo intermediário (macaúba em encosta) está relacionado ao baixo número de palmeiras por unidade amostral do inventário de carbono de palmeiras (conferir capítulo 2). A média de indivíduos de macaúba para todas as unidades amostrais da análise microbiológica (incluindo pastagem sem macaúba) foi de quase quatro indivíduos por unidade amostral, ao passo que a média de indivíduos por unidade amostral em encosta com macaúba foi de 3 indivíduos.

Para as unidades amostrais da análise microbiológica em pastagens não consorciadas, a média de indivíduos de palmeiras foi zero. Na dimensão 1, o parâmetro que mais contribuiu para explicar as correlações foi a densidade de *Nitrospira* (ntspa685). Em topo de morro e baixada com macaúba, os valores de densidade desse táxon foram de $3 \cdot 10^6$ e $1 \cdot 10^6$ cél/g. Em encosta com macaúba, observou-se $7 \cdot 10^5$ cél/g. Tal valor é pelo menos 10 vezes menor que os valores supracitados e se aproxima dos valores para topo de morro e baixada sem macaúba. Esse valor intermediário para

pastagens consorciadas em encosta também justifica sua posição intermediária no gráfico da PCA. A média das densidades de *Arquea* (eury498) foi a segunda maior contribuição na primeira dimensão da PCA ($6 \cdot 10^5$ cél/g). Em pastagens consorciadas com macaúba em baixada, observou-se o maior valor para esse parâmetro ($1 \cdot 10^6$ cél/g). Para as demais partes de vegetação/relevo, foram observados valores entre $2 \cdot 10^5$ e $8 \cdot 10^5$ cél/g (respectivamente, pastagem não consorciada em encosta e pastagem não consorciada em topo de morro). De maneira geral, tal parâmetro contribuiu para manter a maioria das unidades amostrais no lado esquerdo do eixo da primeira dimensão da PCA.

A densidade de *Acidobacteria* (acido228) apresentou a terceira maior contribuição para a primeira dimensão (média de $1 \cdot 10^6$ cél/g). A maior densidade de *Acidobacteria* foi para macaúba em baixada, seguida de pastagem não consorciada em baixada. A densidade de *Acidobacteria* para pastagem não consorciada em topo de morro apresentou valor na mesma escala que baixada consorciada e não consorciada ($1 \cdot 10^6$ cél/g), ao passo que macaúba em encosta, macaúba em topo de morro e pastagem em encosta apresentaram valores na ordem de grandeza 10 vezes menor.

A densidade de *Gammaproteobacteria* (gam42a) apresentou a quarta maior contribuição para a primeira dimensão (média de $1 \cdot 10^6$ cél/g). As densidades desse táxon em áreas com macaúba, assim como sua densidade em pastagem em baixada, apresentaram valores de densidade próximos ou acima da média, ao passo que para topo de morro e encosta em pastagem não consorciada, foram observados valores abaixo da média (7 e $2 \cdot 10^5$ cél/g, respectivamente).

A densidade de *Nitrobacter* (NIT3) apresentou a quinta maior contribuição para a primeira dimensão (média de $1 \cdot 10^6$ cél/g). As densidades de *Nitrobacter* em baixada e encosta com macaúba, assim como em pastagem não consorciada em baixada, apresentaram-se acima da média. Destaca-se a densidade de *Nitrobacter* em pastagem não consorciada em encosta com valores muito abaixo da média ($5 \cdot 10^4$ cél/g) para esse táxon.

5.7 CONCLUSÃO

Os resultados apontaram para uma melhoria nas condições ambientais do solo para a comunidade microbiana quando foram comparadas a comunidade de ambientes com pastagem consorciada com macaúba com aquela de ambientes com pastagem não consorciada. Verificamos também que o relevo importa na estrutura da comunidade microbológica, onde encostas, especialmente em pastagem não consorciada, se demonstram o ambiente com maior fragilidade ambiental para a comunidade microbológica.

5.8 REFERÊNCIAS

ARAUJO, Ademir Sérgio Ferreira *et al.* Microbiological process in agroforestry systems. A review. **Agronomy for Sustainable Development** v. 32, n. 1, p. 215–226 , 18 jan. 2012.

BASCHIEN, Christiane *et al.* Fluorescence in situ Hybridization of Freshwater Fungi. **International Review of Hydrobiology** v. 86, n. 4–5, p. 371–381 , jul. 2001.

BONDI, G. *et al.* Assessment of overgrazing on degradation of sloping soil. **BIOTERRA**, v. 3, p. 9, 2013.

BURGGRAF, S *et al.* Identifying members of the domain Archaea with rRNA-targeted oligonucleotide probes. **Applied and Environmental Microbiology** v. 60, n. 9, p. 3112–3119 , set. 1994.

CARDOSO, Alexandre *et al.* Opportunities and challenges for sustainable production of *A. aculeata* through agroforestry systems. **Industrial Crops and Products** v. 107, p. 573–580 , 2017.

CARDOSO, Elke Jurandy Bran Nogueira; ANDREOTE, Fernando Dini. **Microbiologia do solo**. [S.l.]: Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2020.

CHEN, Wen-Ming *et al.* Legume Symbiotic Nitrogen Fixation by β -Proteobacteria Is Widespread in Nature. **Journal of Bacteriology** v. 185, n. 24, p. 7266–7272 , 15 dez. 2003.

CORRÊA, João Batista Lúcio *et al.* Surface runoff of rainfall in an experimental plantation of macaúba palm (*Acrocomia aculeata*) under different forms of management. **Revista Arvore** v. 42, n. 1 , 2018.

DE LIMA, Natácia Evangelista *et al.* A review of the palm genus *Acrocomia*: Neotropical green gold. **Organisms Diversity and Evolution** v. 18, n. 2, p. 151–161 , 22 jun. 2018.

EVARISTO, Anderson Barbosa *et al.* Actual and putative potentials of macauba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass and Bioenergy** v. 85, p. 18–24 , 2016.

FARIA, Guélmer Júnior Almeida De; FIÚZA, Ana Louise de Carvalho; RODRIGUES, Natália Barbosa. Características sociodemográficas e econômicas dos estabelecimentos agropecuários em regiões empobrecidas: o caso da Zona da Mata Mineira. **COLÓQUIO – Revista do Desenvolvimento Regional - Faccat** v. 19, n. 2, p. 178–199 , 2022.

GARRITY, George M.; BELL, Julia A.; LILBURN, Timothy. Class II. Betaproteobacteria class. nov. **Bergey's Manual® of Systematic Bacteriology**. Boston, MA: Springer US, 2005. p. 575–922.

HARVEY, Celia A. *et al.* Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A review. **Agronomy for Sustainable Development** v. 41, n. 5, p. 62 , 31 out. 2021.

HOVANEC, Timothy A. *et al.* Nitrospira -Like Bacteria Associated with Nitrite Oxidation in Freshwater Aquaria. **Applied and Environmental Microbiology** v. 64, n. 1, p. 258–264 , jan. 1998.

KIELAK, Anna M. *et al.* The Ecology of Acidobacteria: Moving beyond Genes and Genomes. **Frontiers in Microbiology** v. 7 , 31 maio 2016.

KIM, Dong-Jin; LEE, Dong-Ig; KELLER, Jürg. Effect of temperature and free ammonia on nitrification and nitrite accumulation in landfill leachate and analysis of its nitrifying bacterial community by FISH. **Bioresource Technology** v. 97, n. 3, p. 459–468 , fev. 2006.

KLEINSTEUBER, Sabine *et al.* Diversity and in situ quantification of Acidobacteria subdivision 1 in an acidic mining lake. **FEMS Microbiology Ecology** v. 63, n. 1, p. 107–117 , jan. 2008.

LOPES, Carla L. *et al.* Effect of cycle time and airflow in biological nitrogen removal from poultry slaughterhouse wastewater using sequencing batch reactor. **Engenharia Agrícola** v. 35, n. 3, p. 567–577 , jun. 2015.

MANZ, Werner *et al.* Phylogenetic Oligodeoxynucleotide Probes for the Major Subclasses of Proteobacteria: Problems and Solutions. **Systematic and Applied Microbiology** v. 15, n. 4, p. 593–600 , dez. 1992.

MANZ, Werner *et al.* Phylogenetic Oligodeoxynucleotide Probes for the Major Subclasses of Proteobacteria: Problems and Solutions. **Systematic and Applied Microbiology** v. 15, n. 4, p. 593–600 , dez. 1992.

MATOS, Priscila Silva *et al.* Short-term modifications of mycorrhizal fungi, glomalin and soil attributes in a tropical agroforestry. **Acta Oecologica** v. 114, p. 103815 , maio 2022.

MOREIRA, Breno; CARVALHO, Fabrício Alvim. A comunidade arbórea de um fragmento urbano de Floresta Atlântica após 40 anos de sucessão secundária (Juiz de Fora, Minas Gerais). **Biotemas** v. 26, n. 2, p. 59–70 , 2013.

MOREIRA, Sandro Lucio Silva *et al.* Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal of Cleaner Production** v. 265 , 2020.

PALMA, J. H. N. *et al.* Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 119, n. 3–4, p. 320–334, mar. 2007.

PIMENTEL, Leonardo Duarte; BARBOSA, Maria Antônia Machado. Cultivo de macaúba em Sistemas Agroflorestais. **Informe Agropecuário** v. 43, n. 320, p. 63–75 , 2022.

POPLAWSKI, Andrzej Brunon *et al.* Archaeal diversity and community structure in a Swedish barley field: Specificity of the EK510R/(EURY498) 16S rDNA primer. **Journal of Microbiological Methods** v. 69, n. 1, p. 161–173 , abr. 2007.

PRESCOTT, Cindy E.; VESTERDAL, Lars. Decomposition and transformations along the continuum from litter to soil organic matter in forest soils. **Forest Ecology and Management** v. 498, p. 119522 , out. 2021.

ROBARTS, Richard D.; SEPHTON, Lyn M. THE ENUMERATION OF AQUATIC BACTERIA USING DAPI. **Journal of the Limnological Society of Southern Africa** v. 7, n. 2, p. 72–74 , jan. 1981.

RODRIGUES, Rosane C. *et al.* Soil microbial biomass in an agroforestry system of Northeast Brazil. **Tropical Grasslands - Forrajes Tropicales** v. 3, n. 1, p. 41 , 2015.

SALOMÃO PESSOA, José Felipe *et al.* A comunidade arbórea do remanescente florestal urbano do Parque Natural Municipal da Lajinha (Juiz de Fora, MG, Brasil). **Ciência Florestal (01039954)** v. 32, n. 3 , 2022.

SELIGER, Roman *et al.* Rehabilitation of Degraded Sloped Pastures: Lessons Learned in Itaocara, Rio de Janeiro. [S.l: s.n.], 2019. p. 391–404.

SIKORSKI, Johannes. The prokaryotic biology of soil. **Soil organisms** v. 87, n. 1, p. 1–28 , 2015.XIONG, Wu *et al.* Rhizosphere protists are key determinants of plant health. **Microbiome** v. 8, n. 1, p. 27 , 3 dez. 2020.

XU, Shaoyi *et al.* Ubiquity, diversity, and activity of comammox Nitrospira in agricultural soils. **Science of The Total Environment** v. 706, p. 135684 , mar. 2020.

YEATES, Christine *et al.* Limitations of the widely used GAM42a and BET42a probes targeting bacteria in the Gammaproteobacteria radiation. **Microbiology** v. 149, n. 5, p. 1239–1247 , 1 maio 2003.

6 CONCLUSÃO

A macaúba é uma palmeira nativa com grande variabilidade populacional, historicamente associada ao homem por suas valiosas propriedades alimentares. É uma espécie importante ao nível do ecossistema, sendo recurso para uma notável gama de organismos a ela associados. É uma espécie bem estudada, em processo de domesticação, que apresenta atributos de robustez e alta produtividade. Sua alta capacidade de sequestrar carbono, juntamente à mencionada produtividade, a torna uma espécie de grande valor na produção agropecuária. Corrobora-se sua eficácia no fornecimento do importante serviço ecossistêmico de sequestro de carbono, reforçando seu papel como uma das ferramentas para descarbonização da economia através de soluções baseadas na natureza.

Demonstra-se, a partir de modelos, que a espécie pode ser resiliente às mudanças no clima, possibilitando sua utilização mesmo em cenários pessimistas de mudança na adequabilidade da espécie no futuro. Dessa maneira, aponta-se para um reduzido risco ao apostar na utilização massiva da espécie em sistemas silvopastoris em sua área adequada atual, frente às mudanças no clima até o final do século. Apresenta-se também a significativa melhoria do componente microbiológico do solo de pastagens consorciadas com macaúba, quando comparada com pastagens não consorciadas, o que demonstra sua importante contribuição na recuperação de solos. Tal avaliação apresenta o serviço ecossistêmico de proteção de solos prestado pela macaúba sob a ótica da microbiota do solo como um resultado inédito.

Portanto, tais resultados vêm agregar mais valor à macaúba enquanto promissora espécie agrônômica de origem nativa, apta a incrementar o produto interno bruto brasileiro em concordância com a resiliência e a mitigação às mudanças no clima em curso.

7 REFERÊNCIAS

BARONA, E. *et al.* The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 2, p. 024002, abr. 2010.

CASSINO, M. F. *et al.* Archaeobotany of Brazilian Indigenous Peoples and Their Food Plants. *In*: [s.l: s.n.]. p. 127–159.

CORADIN, L.; SIMINSKI, A. **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região sul.** [s.l.] Ministério do Meio Ambiente, 2011.

COSTA, B. E. G. DA; CUKIERMAN, H. L. How anthropogenic climate change prevailed: A case study of controversies around global warming on Portuguese Wikipedia. **New Media & Society**, v. 21, n. 10, p. 2261–2282, 3 out. 2019.

COSTANZA, R. Valuing natural capital and ecosystem services toward the goals of efficiency, fairness, and sustainability. **Ecosystem Services**, v. 43, p. 101096, jun. 2020.

COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, n. 6630, p. 253–260, maio 1997.

LEMOS, E. P. DE; ALVES, R. E.; MADEIRA, N. R. Espécies alimentícias nativas da Região Nordeste. 2018.

FAWZY, S. *et al.* Strategies for mitigation of climate change: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, n. 6, p. 2069–2094, 30 nov. 2020.

GIRARDIN, C. A. J. *et al.* Nature-based solutions can help cool the planet — if we act now. **Nature**, v. 593, n. 7858, p. 191–194, 13 maio 2021.

GROOMBRIDGE, B.; JENKINS, M. D.; JENKINS, M. **World atlas of biodiversity: earth's living resources in the 21st century**. [s.l.] Univ of California Press, 2002.

GUPTA, A. *et al.* Linking Soil Microbial Diversity to Modern Agriculture Practices: A Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 5, p. 3141, 7 mar. 2022.

HUNTER, D. *et al.* The potential of neglected and underutilized species for improving diets and nutrition. **Planta**, v. 250, n. 3, p. 709–729, 25 set. 2019.

KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. **Nature**, v. 423, n. 6939, p. 528–531, 29 maio 2003.

KARL, T. R.; TRENBERTH, K. E. Modern Global Climate Change. **Science**, v. 302, n. 5651, p. 1719–1723, 5 dez. 2003.

KEMFERT, C. Green Deal for Europe: More Climate Protection and Fewer Fossil Fuel Wars. **Intereconomics**, v. 54, n. 6, p. 353–358, 2 nov. 2019.

KINLEY, R. *et al.* Beyond good intentions, to urgent action: Former UNFCCC leaders take stock of thirty years of international climate change negotiations. **Climate Policy**, v. 21, n. 5, p. 593–603, 28 maio 2021.

LOCATELLI, B. Ecosystem Services and Climate Change. *In*: **Routledge Handbook of Ecosystem Services**. New York, NY : Routledge, 2016.: Routledge, 2016. p. 481–490.

MALHI, Y. *et al.* Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 375, n. 1794, p. 20190104, 16 mar. 2020.

MCMANUS, P. Living with anthropogenic climate change: Learning from environmental history to question narratives of doom, hope, and crisis. **Geographical Research**, 21 maio 2023.

MERGENTHALER, S. Mitigating climate change. *In: **Managing Global Challenges***. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. p. 143–165.

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being**. [s.l.] Island press Washington, DC, 2005. v. 5

MILLER, J. A.; HOLLOWAY, P. Niche Theory and Models. *In: **International Encyclopedia of Geography***. [s.l.] Wiley, 2017. p. 1–10.

MOORE, J. W.; SCHINDLER, D. E. Getting ahead of climate change for ecological adaptation and resilience. **Science**, v. 376, n. 6600, p. 1421–1426, 24 jun. 2022.

MORTON, D. C. *et al.* Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 39, p. 14637–14641, 26 set. 2006.

NINAN, K. N.; INOUE, M. Valuing forest ecosystem services: What we know and what we don't. **Ecological Economics**, v. 93, p. 137–149, set. 2013.

ODUNIYI, O. S.; TEKANA, S. S. Adoption of agroforestry practices and climate change mitigation strategies in North West province of South Africa. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, v. 11, n. 5, p. 716–729, 18 nov. 2019.

PEDRUSKI, M. **The ecological niche: historical, modelling, and experimental approaches to one of ecology's central concepts**. [s.l.] McGill University (Canada), 2016.

PIELKE JR, R. A. What is climate change? **Energy & environment**, v. 15, n. 3, p. 515–520, 2004.

QURATULANN, S. *et al.* Review on climate change and its effect on wildlife and ecosystem. **Open Journal of Environmental Biology**, p. 008–014, 11 ago. 2021.

RASHID, M. H. *et al.* Soil Microbes for Sustainable Agriculture. *In*: **Sustainable Management of Soil and Environment**. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 339–382.

RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. **Our World in Data**, 2020.

ROSEN, M. A. Mitigation of Climate Change: Crucial Energy Actions. **Research Journal of Environmental Sciences**, v. 14, n. 1, p. 1–4, 6 jan. 2020.

SALEH, N. M.; SALEH, A. M.; MAHDI, H. H. Production of Biofuels from Biomass as an Approach Towards Sustainable Development: A Short Review. **NTU Journal of Renewable Energy**, v. 3, n. 1, p. 9–21, 25 set. 2022.

SUPRAN, G.; ORESKES, N. Addendum to ‘Assessing ExxonMobil’s climate change communications (1977–2014)’ Supran and Oreskes (2017 Environ. Res. Lett. 12 084019). **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 11, p. 119401, 30 out. 2020.

VIEIRA, R. F. *et al.* **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: Região Centro-Oeste**. [s.l.] Brasília, DF: MMA, 2018., 2018.

WARREN, D. L. In defense of ‘niche modeling’. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 27, n. 9, p. 497–500, set. 2012.

YANG, H.; GOU, X.; YIN, D. Response of Biodiversity, Ecosystems, and Ecosystem Services to Climate Change in China: A Review. **Ecologies**, v. 2, n. 4, p. 313–331, 22 set. 2021.

ZHANG, L. *et al.* GOSAT Mapping of Global Greenhouse Gas in 2020 and 2021. **Atmosphere**, v. 13, n. 11, p. 1814, 31 out. 2022.

APÊNDICE A - BANCO DE DADOS DA AMOSTRAGEM DE MACAÚBAS PARA QUANTIFICAÇÃO DE CARBONO

Tabela 13 - Base de dados para avaliação de carbono em plantio comercial de macaúba. Onde: CAP = circunferência à altura do peito (em centímetros); DAP = diâmetro à altura do peito (em centímetros); Hc = altura comercial (em metros); Ht = altura total (em metros)

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM01	1	113.5	36.13	1.6	4.56	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	42.59	23.06
PM01	2	159	50.61	4.7	8.9	8.7	50 a 60 cm	8 a 12 m	198.72	110.50
PM01	3	129.7	41.28	5.7	8.45	5.2	40 a 50 cm	8 a 12 m	176.34	97.85
PM01	4	177	56.34	2.33	6.56	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	98.42	54.06
PM01	5	161	51.25	6.91	9.9	6.9	50 a 60 cm	8 a 12 m	253.97	141.82
PM01	6	161	51.25	6.78	12.8	7.6	50 a 60 cm	12 a 14 m	458.97	258.95
PM01	7	100	31.83	1	5	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	52.65	28.61
PM12	1	84	26.74	8	11.54	7.6	20 a 30 cm	8 a 12 m	361.51	203.12
PM12	2	92.2	29.35	8.25	10.65	7	20 a 30 cm	8 a 12 m	300.49	168.29
PM12	3	78.5	24.99	7.34	10	8.7	20 a 30 cm	8 a 12 m	259.91	145.20
PM12	4	90.3	28.74	8.14	11.23	8.6	20 a 30 cm	8 a 12 m	339.53	190.56
PM12	5	94.4	30.05	9.3	10.93	5.8	30 a 40 cm	8 a 12 m	319.00	178.85
PM12	6	94	29.92	6.26	8.86	7	20 a 30 cm	8 a 12 m	196.67	109.34
PM12	7	94	29.92	5.34	8.14	7.2	20 a 30 cm	8 a 12 m	161.79	89.65
PM12	8	85	27.06	6.89	9.12	7.1	20 a 30 cm	8 a 12 m	210.22	117.01
PM12	9	85	27.06	7.84	10.4	6	20 a 30 cm	8 a 12 m	284.49	159.18
PM12	10	90	28.65	6.8	9.5	7	20 a 30 cm	8 a 12 m	230.95	128.76

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM12	11	108	34.38	8.1	10.5	7.2	30 a 40 cm	8 a 12 m	290.83	162.79
PM12	12	107	34.06	8	10.9	6.8	30 a 40 cm	8 a 12 m	316.99	177.70
PM12	13	100	31.83	7.8	9.44	7	30 a 40 cm	8 a 12 m	227.60	126.86
PM12	14	100	31.83	9.1	11.5	7	30 a 40 cm	8 a 12 m	358.63	201.47
PM12	15	107	34.06	6.88	9.32	7.9	30 a 40 cm	8 a 12 m	220.99	123.11
PM20	1	140	44.56	7.3	10	6	40 a 50 cm	8 a 12 m	259.91	145.20
PM20	2	115	36.61	6.5	8.6	6.9	30 a 40 cm	8 a 12 m	183.63	101.97
PM20	3	147	46.79	5.5	8.32	6	40 a 50 cm	8 a 12 m	170.15	94.36
PM20	4	154	49.02	4.1	7.5	7	40 a 50 cm	4 a 8 m	133.98	73.99
PM20	5	145	46.15	4.75	7.4	5.9	40 a 50 cm	4 a 8 m	129.90	71.70
PM20	6	150	47.75	6.7	10.35	7	40 a 50 cm	8 a 12 m	281.35	157.39
PM20	7	140	44.56	5.73	8.45	7.2	40 a 50 cm	8 a 12 m	176.34	97.85
PM20	8	140	44.56	8	10.9	7.4	40 a 50 cm	8 a 12 m	316.99	177.70
PM20	9	155	49.34	6.55	9.6	6.5	40 a 50 cm	8 a 12 m	236.59	131.96
PM20	10	150	47.75	2.84	6.1	6.6	40 a 50 cm	4 a 8 m	83.24	45.59
PM20	11	125	39.79	4.4	7	7	30 a 40 cm	4 a 8 m	114.29	62.95
PM20	12	123	39.15	6.75	10.31	6	30 a 40 cm	8 a 12 m	278.85	155.97
PM11	1	126	40.11	1.8	3.57	5.1	40 a 50 cm	Até 4 m	24.23	12.99
PM11	2	166.6	53.03	6.13	8.1	6.9	50 a 60 cm	8 a 12 m	159.97	88.62
PM11	3	152	48.38	6.7	9.37	7.4	40 a 50 cm	8 a 12 m	223.73	124.67
PM11	4	128	40.74	7.85	10.64	6.6	40 a 50 cm	8 a 12 m	299.84	167.92
PM11	5	141	44.88	3.53	6.56	5.9	40 a 50 cm	4 a 8 m	98.42	54.06
PM11	6	128	40.74	6.67	9.2	6.9	40 a 50 cm	8 a 12 m	214.49	119.43
PM11	7	120	38.20	4.37	7.7	5.3	30 a 40 cm	4 a 8 m	142.35	78.70
PM11	8	160.8	51.18	2.44	5	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	52.65	28.61

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM11	9	176	56.02	2.63	5.51	6.6	50 a 60 cm	4 a 8 m	65.85	35.92
PM10	1	161	51.25	5.65	8.06	5.9	50 a 60 cm	8 a 12 m	158.15	87.59
PM10	2	157	49.97	2.23	4.93	4.8	40 a 50 cm	4 a 8 m	50.97	27.68
PM10	3	179	56.98	2.25	5.27	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	59.43	32.36
PM10	4	128	40.74	1.44	3.13	4.6	40 a 50 cm	Até 4 m	17.90	9.55
PM10	5	146.6	46.66	3.24	5.2	4.08	40 a 50 cm	4 a 8 m	57.63	31.36
PM09	1	160	50.93	6.23	9.78	6.1	50 a 60 cm	8 a 12 m	246.93	137.83
PM09	2	146	46.47	6.78	9.13	6.7	40 a 50 cm	8 a 12 m	210.75	117.31
PM09	3	146.2	46.54	8.25	11.72	6.5	40 a 50 cm	8 a 12 m	374.63	210.62
PM09	4	149	47.43	6.92	9.4	6.9	40 a 50 cm	8 a 12 m	225.39	125.60
PM09	5	140	44.56	6.83	9.55	5.5	40 a 50 cm	8 a 12 m	233.76	130.35
PM09	6	161.8	51.50	6.67	9.18	6.7	50 a 60 cm	8 a 12 m	213.42	118.82
PM09	7	164	52.20	5.87	8.05	7	50 a 60 cm	8 a 12 m	157.70	87.34
PM09	8	117	37.24	2.15	4.1	4.1	30 a 40 cm	4 a 8 m	33.33	17.97
PM09	9	157	49.97	8.02	11.44	6.2	40 a 50 cm	8 a 12 m	354.34	199.02
PM09	10	151	48.06	6.8	9.34	6.3	40 a 50 cm	8 a 12 m	222.09	123.73
PM09	11	150	47.75	6.5	8.95	4.1	40 a 50 cm	8 a 12 m	201.31	111.96
PM09	12	138	43.93	7.4	9.2	6	40 a 50 cm	8 a 12 m	214.49	119.43
PM08	4	124	39.47	2.34	4.8	6.4	30 a 40 cm	4 a 8 m	47.93	26.00
PM08	5	144	45.84	2.07	3.85	5.3	40 a 50 cm	Até 4 m	28.84	15.51
PM08	6	153	48.70	4.67	7.08	6.3	40 a 50 cm	4 a 8 m	117.32	64.65
PM06	1	126	40.11	1.2	2.85	4.2	40 a 50 cm	Até 4 m	14.42	7.66
PM06	2	174	55.39	4.13	6.1	6.1	50 a 60 cm	4 a 8 m	83.24	45.59
PM06	3	134	42.65	1.8	3.44	4.5	40 a 50 cm	Até 4 m	22.25	11.91
PM06	4	164	52.20	1.95	3.83	4.9	50 a 60 cm	Até 4 m	28.49	15.32

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM13	1	137	43.61	10.5	13.5	6	40 a 50 cm	12 a 14 m	518.86	293.37
PM13	2	112	35.65	7.05	9.88	8	30 a 40 cm	8 a 12 m	252.79	141.15
PM13	3	109	34.70	6.7	9.45	7.7	30 a 40 cm	8 a 12 m	228.16	127.18
PM13	4	150	47.75	7.6	10.4	7.9	40 a 50 cm	8 a 12 m	284.49	159.18
PM13	5	136	43.29	7.9	10	8.5	40 a 50 cm	8 a 12 m	259.91	145.20
PM13	6	150	47.75	8	10.8	5.3	40 a 50 cm	8 a 12 m	310.33	173.90
PM13	7	80	25.46	7.34	9.3	7	20 a 30 cm	8 a 12 m	219.90	122.49
PM13	8	110	35.01	9.3	12.8	6.8	30 a 40 cm	12 a 14 m	458.97	258.95
PM13	9	144	45.84	9.3	13	6.4	40 a 50 cm	12 a 14 m	475.66	268.53
PM13	10	115	36.61	6.5	8.9	7.8	30 a 40 cm	8 a 12 m	198.72	110.50
PM13	11	120	38.20	3.2	6.4	6.9	30 a 40 cm	4 a 8 m	92.98	51.02
PM13	12	120	38.20	2.97	5.55	6.5	30 a 40 cm	4 a 8 m	66.96	36.54
PM13	13	97	30.88	4.8	7.63	6.1	30 a 40 cm	4 a 8 m	139.39	77.03
PM13	14	100	31.83	4.1	7.64	5.9	30 a 40 cm	4 a 8 m	139.81	77.27
PM13	15	110	35.01	5.3	7.76	7.25	30 a 40 cm	4 a 8 m	144.92	80.14
PM14	1	160	50.93	7.58	10.45	6.3	50 a 60 cm	8 a 12 m	287.65	160.98
PM14	2	114	36.29	5.86	7.9	6.45	30 a 40 cm	4 a 8 m	151.01	83.57
PM14	3	103	32.79	5.77	7.68	6.3	30 a 40 cm	4 a 8 m	141.50	78.22
PM14	4	103	32.79	7.05	10.39	6.8	30 a 40 cm	8 a 12 m	283.86	158.82
PM14	5	133	42.34	5.34	7	7.4	40 a 50 cm	4 a 8 m	114.29	62.95
PM14	6	112	35.65	4.52	6.78	7.2	30 a 40 cm	4 a 8 m	106.19	58.41
PM14	7	142	45.20	4.56	7	8.4	40 a 50 cm	4 a 8 m	114.29	62.95
PM14	10	104	33.10	3.48	5.35	7.2	30 a 40 cm	4 a 8 m	61.53	33.53
PM14	11	111	35.33	4.13	5.83	5.8	30 a 40 cm	4 a 8 m	75.00	41.00
PM15	1	96.6	30.75	7.34	11.58	7.1	30 a 40 cm	8 a 12 m	364.40	204.77

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM15	2	122	38.83	6.64	9.35	7.5	30 a 40 cm	8 a 12 m	222.64	124.04
PM15	3	131.4	41.83	5.9	9.13	6.5	40 a 50 cm	8 a 12 m	210.75	117.31
PM15	4	118	37.56	6.62	10.3	7.3	30 a 40 cm	8 a 12 m	278.23	155.62
PM15	5	108	34.38	9.3	12.9	7.3	30 a 40 cm	12 a 14 m	467.27	263.72
PM15	6	110	35.01	6	9	7.2	30 a 40 cm	8 a 12 m	203.91	113.43
PM15	10	119	37.88	5.35	9.93	7.5	30 a 40 cm	8 a 12 m	255.74	142.83
PM15	11	170	54.11	6.66	11.1	9.3	50 a 60 cm	8 a 12 m	330.55	185.43
PM15	14	110	35.01	4.12	7.8	7	30 a 40 cm	4 a 8 m	146.65	81.12
PM15	16	125	39.79	5.37	9.7	7.2	30 a 40 cm	8 a 12 m	242.30	135.20
PM26	1	137	43.61	6.78	9.78	7.6	40 a 50 cm	8 a 12 m	246.93	137.83
PM26	2	118	37.56	7.8	10.92	9	30 a 40 cm	8 a 12 m	318.33	178.46
PM26	3	117	37.24	8	11.1	6.7	30 a 40 cm	8 a 12 m	330.55	185.43
PM26	5	120	38.20	6.15	8.58	8.5	30 a 40 cm	8 a 12 m	182.65	101.42
PM26	6	130	41.38	7.58	9.67	7.6	40 a 50 cm	8 a 12 m	240.58	134.22
PM26	7	105	33.42	6.83	10.54	6.9	30 a 40 cm	8 a 12 m	293.39	164.25
PM26	8	148	47.11	7.4	10.6	8.8	40 a 50 cm	8 a 12 m	297.25	166.45
PM26	10	100	31.83	5.27	7.3	7.4	30 a 40 cm	4 a 8 m	125.89	69.45
PM26	13	124	39.47	6.4	10.36	8	30 a 40 cm	8 a 12 m	281.98	157.75
PM26	14	135	42.97	8.24	12.8	8	40 a 50 cm	12 a 14 m	458.97	258.95
PM26	15	124	39.47	8	12.4	8.2	30 a 40 cm	12 a 14 m	426.60	240.38
PM19	1	115	36.61	9.25	11.43	7	30 a 40 cm	8 a 12 m	353.62	198.61
PM19	2	114	36.29	8	11	7	30 a 40 cm	8 a 12 m	323.73	181.54
PM19	3	130	41.38	7.7	10.75	6.9	40 a 50 cm	8 a 12 m	307.03	172.02
PM19	4	160	50.93	4.5	6.75	7.5	50 a 60 cm	4 a 8 m	105.11	57.80
PM19	5	109	34.70	6.63	10.7	6.5	30 a 40 cm	8 a 12 m	303.75	170.15

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM19	6	100	31.83	4.13	7.84	8	30 a 40 cm	4 a 8 m	148.39	82.09
PM19	7	98	31.19	5.6	8	7.7	30 a 40 cm	8 a 12 m	155.45	86.07
PM19	8	81	25.78	6.23	9.13	7	20 a 30 cm	8 a 12 m	210.75	117.31
PM19	9	115	36.61	7.7	10.7	7	30 a 40 cm	8 a 12 m	303.75	170.15
PM19	10	136	43.29	7.9	11.5	7	40 a 50 cm	8 a 12 m	358.63	201.47
PM19	11	83	26.42	5.75	8.7	7.3	20 a 30 cm	8 a 12 m	188.59	104.77
PM19	12	96	30.56	6.2	9.7	7.8	30 a 40 cm	8 a 12 m	242.30	135.20
PM19	13	106	33.74	4.4	7.8	7	30 a 40 cm	4 a 8 m	146.65	81.12
PM21	1	140	44.56	2.9	4.76	5.4	40 a 50 cm	4 a 8 m	47.01	25.50
PM21	2	153	48.70	2.8	5.8	5.1	40 a 50 cm	4 a 8 m	74.11	40.51
PM21	3	150	47.75	4.14	8.63	5.4	40 a 50 cm	8 a 12 m	185.11	102.81
PM21	4	120	38.20	2	4.4	4.4	30 a 40 cm	4 a 8 m	39.22	21.20
PM22	1	143	45.52	4.2	8.74	5.4	40 a 50 cm	8 a 12 m	190.59	105.90
PM22	2	140	44.56	2.7	4.9	5.6	40 a 50 cm	4 a 8 m	50.26	27.29
PM22	3	180	57.30	2.3	4.85	6.1	50 a 60 cm	4 a 8 m	49.08	26.64
PM07	1	123	39.15	7.8	5.6	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	68.36	37.31
PM07	2	160	50.93	4.05	6.7	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	103.32	56.81
PM07	3	180	57.30	2.87	5.32	6.3	50 a 60 cm	4 a 8 m	60.74	33.09
PM07	4	180	57.30	2.6	6	5.8	50 a 60 cm	4 a 8 m	80.13	43.86
PM07	5	174	55.39	2.8	6.4	5.9	50 a 60 cm	4 a 8 m	92.98	51.02
PM07	6	130	41.38	1.8	5.3	5.9	40 a 50 cm	4 a 8 m	60.22	32.80
PM07	7	166	52.84	4.2	6.6	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	99.81	54.84
PM07	8	160	50.93	1.8	5.35	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	61.53	33.53
PM07	9	175	55.70	1.8	4.8	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	47.93	26.00
PM07	10	180	57.30	2.5	6.5	7.7	50 a 60 cm	4 a 8 m	96.36	52.91

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM07	11	84	26.74	1.1	4	4	20 a 30 cm	4 a 8 m	31.49	16.96
PM07	12	133	42.34	3.43	6.8	6.9	40 a 50 cm	4 a 8 m	106.91	58.81
PM23	1	168	53.48	8.4	12	7.6	50 a 60 cm	12 a 14 m	395.57	222.60
PM23	2	158	50.29	8.78	11.74	7.5	50 a 60 cm	8 a 12 m	376.11	211.47
PM23	3	140	44.56	5.5	8.67	6.3	40 a 50 cm	8 a 12 m	187.09	103.93
PM23	4	146	46.47	9.4	13.29	6.4	40 a 50 cm	12 a 14 m	500.46	282.78
PM23	5	170	54.11	10.6	13.6	6.3	50 a 60 cm	12 a 14 m	527.76	298.48
PM23	6	174	55.39	7.5	10.75	8	50 a 60 cm	8 a 12 m	307.03	172.02
PM23	7	130	41.38	5.3	9	7.3	40 a 50 cm	8 a 12 m	203.91	113.43
PM23	8	150	47.75	6.65	10.55	8.2	40 a 50 cm	8 a 12 m	294.03	164.61
PM23	9	150	47.75	5.67	8	7	40 a 50 cm	8 a 12 m	155.45	86.07
PM23	10	144	45.84	5.5	7.85	7.3	40 a 50 cm	4 a 8 m	148.82	82.34
PM23	11	164	52.20	6.6	9.44	8	50 a 60 cm	8 a 12 m	227.60	126.86
PM23	12	173	55.07	3.65	6.7	7.2	50 a 60 cm	4 a 8 m	103.32	56.81
PM23	13	110	35.01	2.84	5.5	6	30 a 40 cm	4 a 8 m	65.58	35.77
PM23	14	138	43.93	3.36	6.5	5.2	40 a 50 cm	4 a 8 m	96.36	52.91
PM04	1	130	41.38	2.18	4.6	6.8	40 a 50 cm	4 a 8 m	43.45	23.53
PM04	2	145	46.15	1.8	5.2	5	40 a 50 cm	4 a 8 m	57.63	31.36
PM03	1	131	41.70	6.7	9.4	7	40 a 50 cm	8 a 12 m	225.39	125.60
PM03	2	140	44.56	6.7	10.43	6.8	40 a 50 cm	8 a 12 m	286.38	160.26
PM03	3	134	42.65	3.6	6.5	6	40 a 50 cm	4 a 8 m	96.36	52.91
PM03	4	131	41.70	7.66	11.39	7	40 a 50 cm	8 a 12 m	350.78	196.99
PM03	5	134	42.65	2.2	4.9	5	40 a 50 cm	4 a 8 m	50.26	27.29
PM03	6	160	50.93	2.86	6.65	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	101.56	55.82
PM24	2	160	50.93	7.4	6.4	8	50 a 60 cm	4 a 8 m	92.98	51.02

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM24	3	175	55.70	7.87	10.9	6.9	50 a 60 cm	8 a 12 m	316.99	177.70
PM24	4	160	50.93	5.33	8.5	6.8	50 a 60 cm	8 a 12 m	178.75	99.21
PM24	5	190	60.48	5.75	9.1	7.8	50 a 60 cm	8 a 12 m	209.16	116.41
PM24	7	148	47.11	4.46	8	6.5	40 a 50 cm	8 a 12 m	155.45	86.07
PM24	8	170	54.11	3.45	7	7.3	50 a 60 cm	4 a 8 m	114.29	62.95
PM24	9	180	57.30	3.6	7.6	7	50 a 60 cm	4 a 8 m	138.13	76.33
PM24	10	160	50.93	4.3	7.96	6.6	50 a 60 cm	4 a 8 m	153.67	85.07
PM24	11	160	50.93	1.8	6.9	5.5	50 a 60 cm	4 a 8 m	110.57	60.86
PM24	12	150	47.75	2.42	5.57	5.9	40 a 50 cm	4 a 8 m	67.52	36.85
PM25	1	140	44.56	2.37	5.5	5.5	40 a 50 cm	4 a 8 m	65.58	35.77
PM25	2	130	41.38	1.8	4.36	5	40 a 50 cm	4 a 8 m	38.41	20.76
PM25	3	120	38.20	1.75	4.8	5.5	30 a 40 cm	4 a 8 m	47.93	26.00
PM25	4	140	44.56	1.8	4.9	5.5	40 a 50 cm	4 a 8 m	50.26	27.29
PM25	5	112	35.65	1.8	3.88	6	30 a 40 cm	Até 4 m	29.36	15.79
PM05	1	160	50.93	2.43	6.55	6.9	50 a 60 cm	4 a 8 m	98.07	53.87
PM05	2	130	41.38	5.32	8.14	6	40 a 50 cm	8 a 12 m	161.79	89.65
PM05	3	150	47.75	2.39	5.5	6	40 a 50 cm	4 a 8 m	65.58	35.77
PM05	4	136	43.29	1.8	5.15	6	40 a 50 cm	4 a 8 m	56.36	30.66
PM05	5	130	41.38	1.84	4.6	4.6	40 a 50 cm	4 a 8 m	43.45	23.53
PM05	6	145	46.15	1.8	5	5	40 a 50 cm	4 a 8 m	52.65	28.61
PM05	7	150	47.75	1.8	5.87	6.9	40 a 50 cm	4 a 8 m	76.19	41.67
PM05	8	160	50.93	1.83	4.15	5.5	50 a 60 cm	4 a 8 m	34.28	18.49
PM05	9	114	36.29	2.7	6.03	4.4	30 a 40 cm	4 a 8 m	81.06	44.38
PM05	10	145	46.15	2.8	5.7	5.5	40 a 50 cm	4 a 8 m	71.20	38.89
PM05	11	120	38.20	2	4.6	5.1	30 a 40 cm	4 a 8 m	43.45	23.53

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM05	12	150	47.75	1.8	4.9	5.4	40 a 50 cm	4 a 8 m	50.26	27.29
PM03	7	141	44.88	3.75	6.73	5.2	40 a 50 cm	4 a 8 m	104.39	57.40
PM03	8	100	31.83	2.6	5.3	5.3	30 a 40 cm	4 a 8 m	60.22	32.80
PM03	9	116	36.92	3.1	7	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	114.29	62.95
PM03	10	126	40.11	2	4.9	5.2	40 a 50 cm	4 a 8 m	50.26	27.29
PM03	11	142	45.20	1.8	5.4	4.5	40 a 50 cm	4 a 8 m	62.86	34.27
PM16	1	100	31.83	2.6	4.5	4.6	30 a 40 cm	4 a 8 m	41.31	22.35
PM16	2	117	37.24	1.82	3.84	4.3	30 a 40 cm	Até 4 m	28.66	15.41
PM16	3	109	34.70	3	5.2	4.3	30 a 40 cm	4 a 8 m	57.63	31.36
PM16	4	149	47.43	3.7	6	5.4	40 a 50 cm	4 a 8 m	80.13	43.86
PM16	5	102	32.47	4.13	6.35	6	30 a 40 cm	4 a 8 m	91.31	50.09
PM16	6	87	27.69	5.11	7.18	5.4	20 a 30 cm	4 a 8 m	121.18	66.81
PM16	7	90	28.65	4.65	6.88	5.3	20 a 30 cm	4 a 8 m	109.83	60.45
PM16	8	88	28.01	4.45	6.75	4.9	20 a 30 cm	4 a 8 m	105.11	57.80
PM16	9	76	24.19	4.13	6.8	4.3	20 a 30 cm	4 a 8 m	106.91	58.81
PM16	10	75	23.87	4.33	6.76	5.5	20 a 30 cm	4 a 8 m	105.47	58.00
PM16	11	95	30.24	4.7	7.2	5.8	30 a 40 cm	4 a 8 m	121.95	67.24
PM16	13	89	28.33	2.26	5.6	4.9	20 a 30 cm	4 a 8 m	68.36	37.31
PM16	14	95	30.24	2.4	5.3	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	60.22	32.80
PM16	15	96	30.56	3.36	5.3	4.2	30 a 40 cm	4 a 8 m	60.22	32.80
PM16	16	94	29.92	2.72	5.22	4.7	20 a 30 cm	4 a 8 m	58.14	31.65
PM17	2	95	30.24	3.56	6.45	6.4	30 a 40 cm	4 a 8 m	94.66	51.96
PM17	3	105	33.42	4.05	6.86	6.3	30 a 40 cm	4 a 8 m	109.10	60.04
PM17	4	127	40.43	4.5	7.03	5.8	40 a 50 cm	4 a 8 m	115.42	63.58
PM17	5	110	35.01	4.65	5.9	5.5	30 a 40 cm	4 a 8 m	77.09	42.17

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM17	6	84	26.74	4.1	5.9	5.6	20 a 30 cm	4 a 8 m	77.09	42.17
PM17	7	135	42.97	3	5.32	5.4	40 a 50 cm	4 a 8 m	60.74	33.09
PM17	8	95	30.24	3.5	6.1	5.5	30 a 40 cm	4 a 8 m	83.24	45.59
PM17	9	124	39.47	2.4	5.21	4.9	30 a 40 cm	4 a 8 m	57.89	31.51
PM17	10	113	35.97	2.65	5.2	5.6	30 a 40 cm	4 a 8 m	57.63	31.36
PM17	11	110	35.01	1.8	5.1	5.2	30 a 40 cm	4 a 8 m	55.11	29.97
PM18	1	190	60.48	2.92	5.5	5.9	50 a 60 cm	4 a 8 m	65.58	35.77
PM18	2	98	31.19	3.2	5.9	5.2	30 a 40 cm	4 a 8 m	77.09	42.17
PM18	3	114	36.29	2.15	4.86	5.8	30 a 40 cm	4 a 8 m	49.32	26.77
PM18	4	108	34.38	3	6.26	5.8	30 a 40 cm	4 a 8 m	88.36	48.45
PM18	5	115	36.61	2.85	5.2	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	57.63	31.36
PM18	7	121	38.52	2.75	5.25	5.8	30 a 40 cm	4 a 8 m	58.91	32.08
PM18	8	120	38.20	2.2	4.83	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	48.62	26.38
PM18	9	127	40.43	2.6	5.2	4.6	40 a 50 cm	4 a 8 m	57.63	31.36
PM18	10	81	25.78	2.86	5.23	5.5	20 a 30 cm	4 a 8 m	58.40	31.79
PM18	11	125	39.79	3.5	5.95	5.1	30 a 40 cm	4 a 8 m	78.60	43.01
PM18	12	103	32.79	2.92	5.71	6	30 a 40 cm	4 a 8 m	71.49	39.05
PM02	1	93.5	29.76	5.3	10.5	7.5	20 a 30 cm	8 a 12 m	290.83	162.79
PM02	2	95.5	30.40	6.6	10.5	6	30 a 40 cm	8 a 12 m	290.83	162.79
PM02	3	92.5	29.44	6.6	10	6	20 a 30 cm	8 a 12 m	259.91	145.20
PM02	4	104	33.10	9.1	11.9	8	30 a 40 cm	8 a 12 m	388.02	218.28
PM02	5	76	24.19	6.6	9.2	9	20 a 30 cm	8 a 12 m	214.49	119.43
PM02	6	98	31.19	2.5	5.3	4.5	30 a 40 cm	4 a 8 m	60.22	32.80
PM02	7	75	23.87	5.3	7.8	5	20 a 30 cm	4 a 8 m	146.65	81.12
PM02	8	117	37.24	3	6.6	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	99.81	54.84

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM02	9	70	22.28	4.1	5.7	4.5	20 a 30 cm	4 a 8 m	71.20	38.89
PM02	10	72	22.92	4.1	6.6	5	20 a 30 cm	4 a 8 m	99.81	54.84
PM02	11	75	23.87	4.1	6.5	5	20 a 30 cm	4 a 8 m	96.36	52.91
PM02	12	83	26.42	5.3	7.9	5.3	20 a 30 cm	4 a 8 m	151.01	83.57
PM02	13	70.5	22.44	4.1	6.6	6	20 a 30 cm	4 a 8 m	99.81	54.84
PM02	14	72	22.92	4.1	6.6	5	20 a 30 cm	4 a 8 m	99.81	54.84
PM31	1	114.3	36.38	2.9	6.15	5.6	30 a 40 cm	4 a 8 m	84.82	46.47
PM31	2	123.4	39.28	1.3	4.9	4.9	30 a 40 cm	4 a 8 m	50.26	27.29
PM31	3	115	36.61	1.8	5.15	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	56.36	30.66
PM31	4	148.3	47.21	1.8	5.3	5.15	40 a 50 cm	4 a 8 m	60.22	32.80
PM31	5	132.2	42.08	1.3	4.9	5.15	40 a 50 cm	4 a 8 m	50.26	27.29
PM31	6	146	46.47	3.7	7.45	6	40 a 50 cm	4 a 8 m	131.93	72.84
PM31	7	125	39.79	1.3	4.6	5.1	30 a 40 cm	4 a 8 m	43.45	23.53
PM32	1	103.9	33.07	4.2	7.2	5.79	30 a 40 cm	4 a 8 m	121.95	67.24
PM32	2	98.2	31.26	2.2	5.6	4.9	30 a 40 cm	4 a 8 m	68.36	37.31
PM32	3	133	42.34	1.8	4.9	5.1	40 a 50 cm	4 a 8 m	50.26	27.29
PM32	4	123.5	39.31	1.8	5.1	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	55.11	29.97
PM32	5	124.5	39.63	2.1	6.2	5.9	30 a 40 cm	4 a 8 m	86.42	47.36
PM33	1	135.2	43.04	4.4	8.2	6	40 a 50 cm	8 a 12 m	164.55	91.20
PM33	2	140	44.56	1.3	4.7	6.3	40 a 50 cm	4 a 8 m	45.66	24.75
PM33	3	112	35.65	1.6	4.8	5	30 a 40 cm	4 a 8 m	47.93	26.00
PM33	4	129.7	41.28	1.8	5.3	5.7	40 a 50 cm	4 a 8 m	60.22	32.80
PM34	1	151.2	48.13	1.8	5.6	5.7	40 a 50 cm	4 a 8 m	68.36	37.31
PM34	2	116.4	37.05	1.8	5.2	5.9	30 a 40 cm	4 a 8 m	57.63	31.36
PM34	3	143	45.52	1.3	6.45	6	40 a 50 cm	4 a 8 m	94.66	51.96

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM34	4	158	50.29	1.8	6.5	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	96.36	52.91
PM27	1	130.8	41.63	7.5	11.75	6.5	40 a 50 cm	8 a 12 m	376.84	211.89
PM27	2	170	54.11	7.09	11.7	7	50 a 60 cm	8 a 12 m	373.16	209.78
PM27	3	193	61.43	6.1	10.4	5.8	50 a 60 cm	8 a 12 m	284.49	159.18
PM27	4	171	54.43	2.3	6.8	5	50 a 60 cm	4 a 8 m	106.91	58.81
PM27	5	143.8	45.77	2.3	6.5	5.2	40 a 50 cm	4 a 8 m	96.36	52.91
PM27	6	152.4	48.51	7.05	11.9	7	40 a 50 cm	8 a 12 m	388.02	218.28
PM27	7	174	55.39	1.8	6.2	5.5	50 a 60 cm	4 a 8 m	86.42	47.36
PM27	8	173	55.07	3.8	6.4	6.2	50 a 60 cm	4 a 8 m	92.98	51.02
PM27	9	152	48.38	3.4	7.7	5.5	40 a 50 cm	4 a 8 m	142.35	78.70
PM28	1	155	49.34	2.75	7.4	6	40 a 50 cm	4 a 8 m	129.90	71.70
PM28	2	180	57.30	7.35	11.7	6.7	50 a 60 cm	8 a 12 m	373.16	209.78
PM28	3	166	52.84	4.8	9.1	6.7	50 a 60 cm	8 a 12 m	209.16	116.41
PM28	4	166.5	53.00	6.1	11.25	9.5	50 a 60 cm	8 a 12 m	340.93	191.36
PM28	5	148	47.11	3.6	7.9	6.5	40 a 50 cm	4 a 8 m	151.01	83.57
PM28	6	169	53.79	2.7	7.6	7	50 a 60 cm	4 a 8 m	138.13	76.33
PM28	7	150	47.75	2.2	6.1	6.5	40 a 50 cm	4 a 8 m	83.24	45.59
PM28	8	138	43.93	1.8	5.65	6	40 a 50 cm	4 a 8 m	69.77	38.10
PM28	9	106	33.74	1.8	5.5	6	30 a 40 cm	4 a 8 m	65.58	35.77
PM29	1	179	56.98	3.85	8.5	7	50 a 60 cm	8 a 12 m	178.75	99.21
PM29	2	135	42.97	6.35	10.2	7.3	40 a 50 cm	8 a 12 m	272.05	152.10
PM29	3	162	51.57	3.6	7.6	7	50 a 60 cm	4 a 8 m	138.13	76.33
PM29	4	162	51.57	5.2	9.3	6.5	50 a 60 cm	8 a 12 m	219.90	122.49
PM29	5	165	52.52	1.8	5.6	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	68.36	37.31
PM29	6	116	36.92	1.3	4.5	4.5	30 a 40 cm	4 a 8 m	41.31	22.35

Parcela	Indivíduo	CAP (cm)	DAP (cm)	Hc (m)	Ht (m)	Diâmetro Copa (m)	Classes Diam	Classe Altura	Massa seca (Moreira kg)	Carbono (Moreira - kg)
PM29	7	168	53.48	1.8	5.7	6	50 a 60 cm	4 a 8 m	71.20	38.89
PM29	8	130	41.38	3	6.7	6.8	40 a 50 cm	4 a 8 m	103.32	56.81
PM29	9	128	40.74	1.8	5.4	5	40 a 50 cm	4 a 8 m	62.86	34.27

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

APÊNDICE B - BANCO DE DADOS DA AMOSTRAGEM DA MICROBIOTA DO SOLO

Tabela 14 - Base de dados da avaliação da microbiota do solo em pastagens consorciadas e pastagens não consorciadas

Vegetação	Faixa Relevo	Inclinação	Amostra	Parecela	DAPI	Acido 228	Bet42A	eury498	fun 1429	gam42a	NIT3	ntspa685
Macaúba	Baixada	1	48	PM26P3A	1.2093	0.0000	0.0000	0.0070	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000
Macaúba	Baixada	1	42	PM14P3A	0.3126	0.0000	0.0000	0.0000	0.0192	0.0000	0.0000	0.0000
Macaúba	Baixada	2	57	PM12P3A	0.6307	0.0000	0.0017	0.0000	0.0157	0.0017	0.0000	0.0000
Macaúba	Baixada	1	44	PM15P2A	0.5155	0.0000	0.0000	0.0000	0.0262	0.0017	0.0000	0.0000
Macaúba	Baixada	1	52	PM13P1A	1.1133	0.0035	0.0000	0.0017	0.0070	0.0000	0.0017	0.0000
Macaúba	Baixada	1	45	PM15P3A	0.4908	0.0052	0.0000	0.0000	0.0174	0.0017	0.0017	0.0000
Macaúba	Baixada	1	47	PM26P2A	2.1868	0.0035	0.0279	0.0052	0.0227	0.0157	0.0035	0.0000
Macaúba	Baixada	1	41	PM14P2A	0.0480	0.0000	0.0017	0.0000	0.0174	0.0000	0.0052	0.0000
Macaúba	Baixada	1	54	PM13P3A	0.9392	0.0017	0.0000	0.0070	0.0209	0.0384	0.0087	0.0017
Macaúba	Baixada	1	43	PM15P1A	0.7006	0.0035	0.0366	0.0157	0.0279	0.0070	0.0262	0.0017
Macaúba	Baixada	2	55	PM12P1A	0.7801	0.0105	0.0105	0.0035	0.0157	0.0489	0.0017	0.0122
Macaúba	Baixada	2	56	PM12P2A	1.7179	0.0087	0.0140	0.0000	0.0192	0.0070	0.0244	0.0157
Macaúba	Baixada	1	40	PM14P1A	0.5100	0.0000	0.0000	0.0052	0.0192	0.0105	0.0017	0.0192
Macaúba	Baixada	1	53	PM13P2A	6.8799	0.0279	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0384	0.0907
Macaúba	Baixada	1	46	PM26P1A	5.3895	0.5497	0.1623	0.1553	0.0140	0.1710	0.3089	0.3630
Macaúba	Encosta	4	4	PM32P1A	0.1440	0.0000	0.0000	0.0000	0.0052	0.0000	0.0000	0.0000
Macaúba	Encosta	3	13	PM31P1A	0.0666	0.0035	0.0000	0.0000	0.0122	0.0000	0.0000	0.0000
Macaúba	Encosta	3	3	PM34P3A	1.2559	0.0017	0.0000	0.0000	0.0681	0.0017	0.0000	0.0000

Vegetação	Faixa Relevo	Inclinação	Amostra	Parecela	DAPI	Acido 228	Bet42A	eury498	fun 1429	gam42a	NIT3	ntspa685
Macaúba	Encosta	3	85	PM34P1A	0.8418	0.0017	0.0017	0.0000	0.0035	0.0070	0.0122	0.0000
Macaúba	Encosta	3	15	PM31P3A	1.1846	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0471	0.0000
Macaúba	Encosta	4	5	PM32P2A	0.6787	0.0052	0.0000	0.0052	0.0140	0.0611	0.0698	0.0000
Macaúba	Encosta	3	49	PM04P1A	0.7746	0.0000	0.0000	0.0000	0.0070	0.0000	0.0000	0.0017
Macaúba	Encosta	3	50	PM04P2A	1.1201	0.0174	0.0052	0.0140	0.0087	0.0017	0.1623	0.0017
Macaúba	Encosta	3	10	PM33P1A	0.7883	0.0000	0.0000	0.0017	0.0140	0.0000	0.0000	0.0052
Macaúba	Encosta	3	11	PM33P2A	1.6658	0.0140	0.0087	0.0035	0.0105	0.0070	0.0070	0.0052
Macaúba	Encosta	3	12	PM33P3A	1.7426	0.0017	0.0017	0.0174	0.0087	0.0000	0.0279	0.0052
Macaúba	Encosta	3	51	PM04P3A	1.4684	0.0105	0.0105	0.0157	0.0209	0.0052	0.0035	0.0122
Macaúba	Encosta	3	14	PM31P2A	1.8948	0.0000	0.0000	0.0000	0.0105	0.0000	0.0174	0.0122
Macaúba	Encosta	3	2	PM34P2A	0.3277	0.0087	0.0127	0.0095	0.0555	0.0646	0.0000	0.0227
Macaúba	Encosta	4	6	PM32P3A	0.7678	0.0000	0.0000	0.0070	0.1221	0.0122	0.0209	0.0401
Macaúba	Topo	1	38	PM28P2A	0.6499	0.0000	0.0017	0.0017	0.0366	0.0017	0.0035	0.0000
Macaúba	Topo	2	28	PM24P2A	2.5172	0.0017	0.0017	0.0000	0.0017	0.0017	0.0000	0.0017
Macaúba	Topo	2	30	PM24P4A	1.9249	0.0122	0.0157	0.0017	0.0314	0.0366	0.0070	0.0017
Macaúba	Topo	2	29	PM24P3A	1.8358	0.0070	0.0087	0.0087	0.0279	0.0070	0.0087	0.0017
Macaúba	Topo	1	31	PM27P1A	2.4281	0.0419	0.0035	0.0244	0.0174	0.0017	0.0157	0.0017
Macaúba	Topo	1	37	PM28P1A	0.8103	0.0052	0.0000	0.0017	0.0209	0.0105	0.0087	0.0035
Macaúba	Topo	1	32	PM27P2A	1.2655	0.0000	0.0000	0.0017	0.0157	0.0035	0.0000	0.0052
Macaúba	Topo	1	39	PM28P3A	1.3011	0.0000	0.0017	0.0017	0.0140	0.0140	0.0052	0.0052
Macaúba	Topo	1	8	PM30P2A	0.6416	0.0000	0.0000	0.0052	0.0087	0.0035	0.0035	0.0087
Macaúba	Topo	1	34	PM29P1A	2.0442	0.0314	0.0052	0.0052	0.0227	0.0000	0.0052	0.0087

Vegetação	Faixa Relevo	Inclinação	Amostra	Parecela	DAPI	Acido 228	Bet42A	eury498	fun 1429	gam42a	NIT3	ntspa685
Macaúba	Topo	1	36	PM29P3A	1.9661	0.0017	0.0349	0.0052	0.0209	0.0017	0.0052	0.0087
Macaúba	Topo	2	7	PM30P1A	3.0931	0.0017	0.0052	0.0140	0.0070	0.0663	0.0017	0.0122
Macaúba	Topo	1	9	PM30P3A	1.0584	0.0017	0.0122	0.0000	0.0087	0.0297	0.0035	0.0174
Macaúba	Topo	1	33	PM27P3A	0.7617	0.0035	0.0017	0.0017	0.0192	0.0017	0.0000	0.0384
Macaúba	Topo	1	35	PM29P2A	1.7138	0.0000	0.0000	0.0209	0.0314	0.0035	0.0052	0.0401
Pastagem	Baixada	2	19	PP02P1A	0.8075	0.0087	0.0000	0.0000	0.0122	0.0000	0.0000	0.0000
Pastagem	Baixada	1	26	PP04P2A	1.0146	0.0000	0.0017	0.0000	0.0140	0.0000	0.0000	0.0000
Pastagem	Baixada	1	69	PP05P3A	1.7111	0.0017	0.0087	0.0017	0.0105	0.0017	0.0000	0.0000
Pastagem	Baixada	1	67	PP05P1A	0.7883	0.0070	0.0052	0.0000	0.0157	0.0052	0.0000	0.0000
Pastagem	Baixada	1	22	PP03P1A	0.9090	0.0035	0.0017	0.0052	0.0105	0.0000	0.0035	0.0000
Pastagem	Baixada	1	68	PP05P2A	3.5386	0.0000	0.2042	0.0279	0.0000	0.0593	0.0715	0.0000
Pastagem	Baixada	1	23	PP03P2A	1.3930	0.0000	0.0000	0.0000	0.0140	0.0000	0.0000	0.0017
Pastagem	Baixada	1	27	PP04P3A	0.8638	0.0000	0.0140	0.0017	0.0070	0.0000	0.0017	0.0017
Pastagem	Baixada	2	25	PP04P1A	0.1193	0.0000	0.0000	0.0140	0.0087	0.0000	0.0052	0.0017
Pastagem	Baixada	2	21	PP02P3A	0.8363	0.0995	0.0000	0.0122	0.0140	0.0105	0.0052	0.0035
Pastagem	Baixada	1	24	PP03P3A	1.4931	0.0000	0.0017	0.0000	0.0105	0.0017	0.0000	0.0070
Pastagem	Baixada	2	18	PP01P3A	0.7692	0.0114	0.0000	0.0027	0.0149	0.0289	0.0045	0.0167
Pastagem	Baixada	2	16	PP01P1A	0.7774	0.0035	0.0105	0.0017	0.0262	0.0000	0.0000	0.0192
Pastagem	Baixada	2	17	PP01P2A	0.6787	0.0122	0.0105	0.0506	0.0227	0.0087	0.0087	0.0227
Pastagem	Baixada	2	20	PP02P2A	1.2298	0.0244	0.0000	0.0000	0.0140	0.0000	0.0140	0.0471
Pastagem	Encosta	3	80	PP09P2A	0.1357	0.0035	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Pastagem	Encosta	3	81	PP09P3A	0.6430	0.0611	0.1885	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Vegetação	Faixa Relevo	Inclinação	Amostra	Parecela	DAPI	Acido 228	Bet42A	eury498	fun 1429	gam42a	NIT3	ntspa685
Pastagem	Encosta	3	74	PP10P2A	0.1001	0.0002	0.0000	0.0000	0.0142	0.0000	0.0000	0.0000
Pastagem	Encosta	3	71	PP06P2A	0.2660	0.0000	0.0000	0.0000	0.0209	0.0000	0.0000	0.0000
Pastagem	Encosta	3	79	PP09P1A	0.4634	0.0122	0.0000	0.0000	0.0070	0.0017	0.0000	0.0000
Pastagem	Encosta	3	75	PP10P3A	0.2290	0.0105	0.0000	0.0157	0.0105	0.0017	0.0000	0.0000
Pastagem	Encosta	2	72	PP06P3A	0.1700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0332	0.0017	0.0000	0.0000
Pastagem	Encosta	3	65	PP08P2A	0.4291	0.0000	0.0000	0.0000	0.0070	0.0122	0.0000	0.0000
Pastagem	Encosta	2	61	PP07P1A	0.6183	0.0035	0.0000	0.0000	0.0052	0.0035	0.0017	0.0000
Pastagem	Encosta	3	66	PP08P3A	0.3894	0.0000	0.0000	0.0000	0.0087	0.0052	0.0035	0.0000
Pastagem	Encosta	2	64	PP08P1A	0.3798	0.0017	0.0000	0.0000	0.0122	0.0000	0.0000	0.0017
Pastagem	Encosta	3	62	PP07P2A	1.2833	0.0052	0.0052	0.0017	0.0105	0.0017	0.0000	0.0017
Pastagem	Encosta	3	70	PP06P1A	0.2852	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000	0.0017	0.0017
Pastagem	Encosta	3	73	PP10P1A	0.1919	0.0209	0.0174	0.0140	0.0035	0.0000	0.0000	0.0035
Pastagem	Encosta	3	63	PP07P3A	0.4620	0.0000	0.0000	0.0052	0.0122	0.0052	0.0017	0.0070
Pastagem	Topo	2	83	PP13P2A	0.0617	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Pastagem	Topo	2	82	PP13P1A	0.6430	0.0611	0.1885	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Pastagem	Topo	2	88	PP14P1A	1.3025	0.0000	0.0000	0.0192	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000
Pastagem	Topo	1	76	PP11P1A	0.6787	0.0105	0.0000	0.0000	0.0157	0.0000	0.0000	0.0000
Pastagem	Topo	1	86	PP12P2A	0.5594	0.0000	0.0000	0.0000	0.0209	0.0000	0.0000	0.0000
Pastagem	Topo	2	59	PP15P2A	1.7385	0.0593	0.0000	0.0000	0.0174	0.0122	0.0000	0.0000
Pastagem	Topo	1	78	PP11P3A	1.2614	0.0960	0.0174	0.0017	0.0122	0.0000	0.0017	0.0000
Pastagem	Topo	2	89	PP14P2A	1.4588	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000	0.0122	0.0401	0.0000
Pastagem	Topo	2	84	PP13P3A	0.5854	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1239	0.0681	0.0000

Vegetação	Faixa Relevo	Inclinação	Amostra	Parecela	DAPI	Acido 228	Bet42A	eury498	fun 1429	gam42a	NIT3	ntspa685
Pastagem	Topo	2	87	PP12P3A	0.5841	0.0017	0.0000	0.0332	0.0035	0.0366	0.2042	0.0000
Pastagem	Topo	1	77	PP11P2A	3.2507	0.0017	0.0140	0.0000	0.0052	0.0017	0.0035	0.0017
Pastagem	Topo	2	90	PP14P3A	0.2619	0.0052	0.0000	0.0000	0.0262	0.0035	0.0000	0.0035
Pastagem	Topo	2	60	PP15P3A	2.5309	0.2495	0.0558	0.0244	0.0000	0.0523	0.0000	0.0087
Pastagem	Topo	2	58	PP15P1A	0.4003	0.0489	0.0174	0.0140	0.0087	0.0942	0.0087	0.0262
Pastagem	Topo	1	1	PP12P1A	0.8720	0.0105	0.0122	0.0070	0.0872	0.0122	0.0576	0.1082

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

**APÊNDICE C - COORDENADAS DAS UNIDADES AMOSTRAIS PARA
AVALIAÇÃO DA MICROBIOTA DO SOLO**

Tabela 15 - Localização da unidades amostrais separadas por tipo de cobertura vegetal e relevo (coordenadas UTM - SIRGAS 2000).

Vegetação	Relevo	Ponto Microbiota	X	Y
Macaúba	Baixada	PM12P1A	605972.695	7575773.923
Macaúba	Baixada	PM12P2A	605971.522	7575768.396
Macaúba	Baixada	PM12P3A	605972.134	7575767.285
Macaúba	Baixada	PM13P1A	605841.856	7575671.180
Macaúba	Baixada	PM13P2A	605838.102	7575665.891
Macaúba	Baixada	PM13P3A	605834.143	7575660.825
Macaúba	Baixada	PM14P1A	605779.582	7575580.266
Macaúba	Baixada	PM14P2A	605776.676	7575578.182
Macaúba	Baixada	PM14P3A	605774.272	7575573.991
Macaúba	Baixada	PM15P1A	605697.678	7575473.098
Macaúba	Baixada	PM15P2A	605697.843	7575466.898
Macaúba	Baixada	PM15P3A	605693.711	7575466.815
Macaúba	Baixada	PM26P1A	605579.693	7575376.577
Macaúba	Baixada	PM26P2A	605577.948	7575378.249
Macaúba	Baixada	PM26P3A	605573.085	7575377.064
Macaúba	Encosta	P32P1A	606181.935	7575644.993
Macaúba	Encosta	PM04P1A	606259.981	7575576.609
Macaúba	Encosta	PM04P2A	606263.855	7575584.333
Macaúba	Encosta	PM04P3A	606261.403	7575573.057
Macaúba	Encosta	PM31P1A	606224.921	7575600.978
Macaúba	Encosta	PM31P2A	606224.376	7575596.774
Macaúba	Encosta	PM31P3A	606218.925	7575600.243
Macaúba	Encosta	PM32P2A	606182.682	7575648.531
Macaúba	Encosta	PM32P3A	606181.574	7575652.745
Macaúba	Encosta	PM33P1A	606281.062	7575531.744
Macaúba	Encosta	PM33P2A	606279.486	7575527.769
Macaúba	Encosta	PM33P3A	606280.590	7575522.891
Macaúba	Encosta	PM34P1A	606320.616	7575468.932
Macaúba	Encosta	PM34P2A	606317.731	7575470.058
Macaúba	Encosta	PM34P3A	606319.578	7575468.164
Macaúba	Topo	PM24P2A	606205.427	7575744.026
Macaúba	Topo	PM24P3A	606205.380	7575737.052
Macaúba	Topo	PM24P4	606206.291	7575734.167
Macaúba	Topo	PM27P1A	606225.041	7575757.621
Macaúba	Topo	PM27P2A	606222.377	7575760.849
Macaúba	Topo	PM27P3A	606216.699	7575761.330
Macaúba	Topo	PM28P1A	606253.064	7575685.034
Macaúba	Topo	PM28P2A	606249.273	7575689.598
Macaúba	Topo	PM28P3A	606247.645	7575693.262
Macaúba	Topo	PM29P1A	606249.524	7575665.463

Vegetação	Relevo	Ponto Microbiota	X	Y
Macaúba	Topo	PM29P2A	606252.102	7575664.782
Macaúba	Topo	PM29P3A	606254.661	7575661.333
Macaúba	Topo	PM30P1A	606356.198	7575522.384
Macaúba	Topo	PM30P2B	606352.431	7575530.601
Macaúba	Topo	PM30P3A	606349.668	7575534.494
Pastagem	Encosta	PP06P1A	605456.726	7573879.699
Pastagem	Encosta	PP06P2	605459.605	7573877.798
Pastagem	Encosta	PP06P3A	605464.834	7573872.007
Pastagem	Encosta	PP07P1A	605476.467	7573850.785
Pastagem	Encosta	PP07P2A	605479.447	7573848.551
Pastagem	Encosta	PP07P3A	605483.462	7573846.532
Pastagem	Encosta	PP08P1	605439.456	7573891.991
Pastagem	Encosta	PP08P2A	605436.159	7573893.231
Pastagem	Encosta	PP08P3	605431.337	7573898.023
Pastagem	Encosta	PP09P1A	605413.768	7573911.978
Pastagem	Encosta	PP09P2A	605410.187	7573917.094
Pastagem	Encosta	PP09P3A	605406.606	7573922.210
Pastagem	Encosta	PP10P1A	605393.298	7573940.011
Pastagem	Encosta	PP10P2A	605392.506	7573945.220
Pastagem	Encosta	PP10P3A	605390.154	7573948.778
Pastagem	Topo	PP01P1A	605305.171	7573936.059
Pastagem	Topo	PP01P2A	605312.597	7573934.570
Pastagem	Topo	PP01P3A	605317.107	7573929.337
Pastagem	Topo	PP02P1A	605328.162	7573898.931
Pastagem	Topo	PP02P2A	605330.080	7573892.166
Pastagem	Topo	PP02P3A	605335.313	7573886.928
Pastagem	Topo	PP03P1A	605343.263	7573855.546
Pastagem	Topo	PP03P2A	605344.585	7573852.438
Pastagem	Topo	PP03P3A	605348.995	7573847.759
Pastagem	Topo	PP04P1A	605366.086	7573824.065
Pastagem	Topo	PP04P2A	605369.347	7573817.401
Pastagem	Topo	PP04P3A	605373.036	7573813.060
Pastagem	Topo	PP05P1A	605391.130	7573784.931
Pastagem	Topo	PP05P2A	605393.362	7573778.939
Pastagem	Topo	PP05P3A	605396.115	7573773.606
Pastagem	Topo	PP11P1A	605467.222	7574028.967
Pastagem	Topo	PP11P2A	605468.021	7574024.977
Pastagem	Topo	PP11P3A	605473.460	7574019.627
Pastagem	Topo	PP12P1A	605484.803	7574001.396
Pastagem	Topo	PP12P2A	605486.015	7573997.292
Pastagem	Topo	PP12P3A	605489.584	7573990.404
Pastagem	Topo	PP13P1A	605503.422	7573974.592
Pastagem	Topo	PP13P2A	605507.628	7573970.247
Pastagem	Topo	PP13P3A	605512.035	7573965.125
Pastagem	Topo	PP14P1A	605522.655	7573946.899
Pastagem	Topo	PP14P2A	605524.780	7573940.243
Pastagem	Topo	PP14P3A	605528.260	7573935.570
Pastagem	Topo	PP15P1A	605544.784	7573919.851
Pastagem	Topo	PP15P2A	605547.852	7573915.292

Vegetação	Relevo	Ponto Microbiota	X	Y
Pastagem	Topo	PP15P3A	605548.427	7573908.535