



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

LUCIANE GOMES FIEL

**SISTEMAS AGROFLORESTAIS MIMETIZAM ECOSISTEMAS
NATURAIS E PODEM SER RESILIENTES FRENTE ÀS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AMAZÔNIA**

BELÉM-PA

2023

LUCIANE GOMES FIEL

**SISTEMAS AGROFLORESTAIS MIMETIZAM ECOSISTEMAS
NATURAIS E PODEM SER RESILIENTES FRENTE ÀS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará, em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária /Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Jorge Serejo dos Anjos.

BELÉM-PA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F452s Fiel, Luciane Gomes.

Sistemas agroflorestais mimetizam ecossistemas naturais e podem ser resilientes frente às mudanças climáticas na Amazônia / Luciane Gomes Fiel. — 2023.

77 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Luciano Jorge Serejo dos Anjos

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2023.

1. Biomimética. 2. Índice de vegetação. 3. Cenários climáticos futuros. 4. Espaço operacional climaticamente seguro. I. Título.

CDD 333.707

LUCIANE GOMES FIEL

**SISTEMAS AGROFLORESTAIS MIMETIZAM ECOSISTEMAS
NATURAIS E PODEM SER RESILIENTES FRENTE ÀS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará, em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária /Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais.

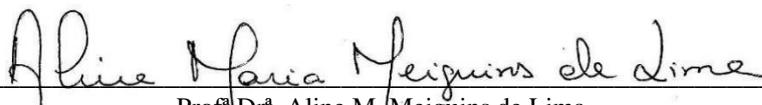
Data de aprovação: 30/05/2023

Banca Examinadora:

LUCIANO JORGE
SEREJO DOS
ANJOS:84176938
234

Assinado de forma digital
por LUCIANO JORGE
SEREJO DOS
ANJOS:84176938234
Dados: 2023.10.06

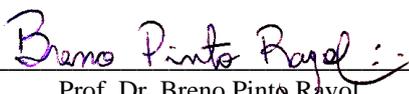
Prof. Dr. Luciano Jorge Serejo dos Anjos
Orientador - Doutor em Ciências Ambientais
Universidade Federal Rural da Amazônia (Campus Parauapebas)



Prof.^a/Dr.^a. Aline M. Meiguins de Lima
Membro Interno - Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza
Membro Interno – Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Breno Pinto Rayol
Membro Externo Doutor em Biodiversidade e Biotecnologia
Universidade Federal Rural da Amazônia

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho é resultado do amor e cuidado que Deus tem por mim, meu maior alicerce, refúgio e consolo. E pela intercessão de Nazinha que direcionou que as pessoas certas estivessem comigo nessa jornada.

Agradeço ao meu avô, Antônio (*em memória*), minha figura paterna, que sempre me acompanhou, encorajou. Sei que onde estiver, estás a olhar por mim. Sua lembrança continua viva, presente e latente no meu dia a dia. Agradeço também a minha amada avó, minha Neuzinha, pelo companheirismo, cuidado e orações diárias. Obrigada por ser luz, amor e aconchego. E principalmente por ser tão forte e seguir nesta vida comigo.

À minha Leinha, meu coração, mãe solo de 3 filhos, que abdicou de sonhos para garantir que nós tivéssemos a oportunidade de estudar e formar. Mulher guerreira, resiliente e mãe coruja. Nossas conquistas são fruto da sua garra, persistência e superação às adversidades da vida. Te amo mais que tudo. E aos meus caçulinhas, Matheus H. e Lucas H., obrigada por serem minhas razões para prosseguir e nunca desistir. Vocês são preciosos demais.

Agradeço em especial, meu orientador, Luciano dos Anjos. Excelente profissional, grande pesquisador e um ser humano incrível. Sua generosidade, paciência e compromisso com a educação tornaram essa jornada possível. Posso dizer que tive o presente, o prazer e a sorte de poder ser sua primeira orientanda e aprender tanto com você. Obrigada por todo incentivo, confiança e parceria de sempre.

Aos meus amados amigos, Albertino, Andria, Lucas, Marina e Matheus, com os quais divido todos os momentos, as conquistas e frustrações. Obrigada pelo apoio incondicional, pela parceria e por serem irmãos para mim. Amo e admiro demais cada um de vocês. Para sempre juntos!

Aos meus familiares, tios, tias e primas, que sei que torcem sempre pelo meu melhor, minha gratidão e amor, em especial à Thaís, Thamires e Thayanne que sempre se alegram com minhas conquistas.

Agradeço aos queridos colegas, Lucyana, Gabriel e Kemuel pelas contribuições, sugestões e trocas acadêmicas. Agradeço também a banca pelas valiosas contribuições desde a qualificação. Ao CNPq pelo apoio financeiro e à Coordenação do PPGCA pela disponibilidade e cooperação.

RESUMO

Embora os Sistemas Agroflorestais (SAFs) promovam diversos serviços ambientais, em especial, o sequestro e fixação de carbono, seu papel na adaptação às mudanças climáticas e as maneiras diferenciadas pelas quais estes sistemas podem contribuir nos contextos biofísicos e geográficos para região amazônica ainda são escassos. O que demonstra a necessidade de pesquisas mais completas e aprofundadas para fortalecer a compreensão das potencialidades, bem como exposição e riscos a climas não-análogos que estes podem estar sujeitos em um futuro próximo. Desta maneira, a presente pesquisa se propôs a analisar os SAFs localizados no município de Tomé-Açu, nordeste do estado do Pará, com os seguintes objetivos: I) Avaliar se os SAFs conseguem mimetizar ecossistemas naturais em sua estrutura, assim como avaliar a estabilidade e funcionalidade ecossistêmica desses sistemas em série temporal de 20 anos, no município de Tomé-Açu e II) Avaliar a exposição dos SAFs do município de Tomé-Açu às mudanças climáticas futuras, considerando o aumento da Temperatura Média Anual (BIO1) e a variação na disponibilidade de água (BIO12 e BIO15), em uma abordagem de EOCS. Os resultados nesta pesquisa alcançaram respostas positivas aos objetivos propostos, de maneira que os SAFs da região de Tomé-Açu apresentaram padrão de comportamento de EVI ao longo de 20 anos, sem diferirem significativamente das florestas. Quanto a biomassa acima do solo, apesar de reduzir ao longo do tempo para ambas as coberturas, apresentou certa estabilidade, sobretudo nos anos de 2019 e 2020 para os SAFs. Destaca-se assim que os SAFs conseguem ser similares do ponto de vista estrutural às florestas maduras. Quanto a exposição às mudanças climáticas, observou-se aumentos consideráveis de temperaturas, de 1,56 °C a 5,4 °C acima da média atual do cenário intermediário para o mais pessimista. Ao mesmo tempo que haverá redução de precipitação acumulada de 96 mm a 220 mm até o final do século e a sazonalidade aumentará em torno de 4-8%, com destaque para o período de 2081-2100. O EOCS para os SAFs se limita as mínimas e máximas das variáveis BIO12 e BIO15, de 2100 a 2300mm e entre 70 e 77%, respectivamente. Faixas que garantem o bom funcionamento destes sistemas em período atual, que estão sob ameaça para um futuro próximo, em especial em cenário SSP5-8.5. Concluímos que quanto a exposição climática, a região Noroeste e centroeste de Tomé-Açu sofrerão com as extremas mudanças de redução de precipitação e aumento da sazonalidade, enquanto que a região Leste estará expostas a condições mais amenas, com alguns extremos na BIO15, que em cenário pessimista, reduzem de extremos para medianos e baixos, podendo indicar que os SAFs apresentam -se adaptáveis as mudanças futuras. Esses resultados são relevantes e chamam a atenção para adoção de medidas que evitem cenários mais críticos de mudanças climáticas para a região amazônica.

Palavras-chave: biomimética; índice de vegetação; cenários climáticos futuros; espaço operacional climaticamente seguro.

ABSTRACT

Although Agroforestry Systems (SAFs) promote various environmental services, especially carbon sequestration and fixation, their role in adapting to climate change and the different ways in which these systems can contribute to the biophysical and geographical contexts of the Amazon region are still scarce. This demonstrates the need for more complete and in-depth research to strengthen understanding of the potential, as well as the exposure and risks to non-analogous climates that they may be subject to in the near future. This research aimed to analyze the SAFs located in the municipality of Tomé-Açu, in the northeast of the state of Pará, with the following objectives: I) To assess whether SAFs can mimic natural ecosystems in their structure, as well as to assess the stability and ecosystem functionality of these systems over a 20-year time series in the municipality of Tomé-Açu and II) To assess the exposure of SAFs in the municipality of Tomé-Açu to future climate change, considering the increase in Average Annual Temperature (BIO1) and the variation in water availability (BIO12 and BIO15), in an EOCS approach. The results of this research achieved positive responses to the proposed objectives, so that the SAFs in the Tomé-Açu region showed a pattern of EVI behavior over 20 years, without differing significantly from the forests. As for above-ground biomass, although it decreased over time for both covers, it showed some stability, especially in the years 2019 and 2020 for the SAFs. This shows that the SAFs are structurally similar to mature forests. As for exposure to climate change, there were considerable increases in temperatures, from 1.56 °C to 5.4 °C above the current average from the intermediate to the most pessimistic scenario. At the same time, there will be a reduction in accumulated rainfall of between 96 mm and 220 mm by the end of the century and seasonality will increase by around 4-8%, especially in the period 2081-2100. The EOCS for the SAFs is limited to the minimum and maximum of the BIO12 and BIO15 variables, from 2100 to 2300mm and between 70 and 77%, respectively. These ranges guarantee the proper functioning of these systems in the current period, but are under threat in the near future, especially in the SSP5-8.5 scenario. We conclude that in terms of climate exposure, the northwest and central regions of Tomé-Açu will suffer from extreme changes in rainfall reduction and increased seasonality, while the eastern region will be exposed to milder conditions, with some extremes in BIO15, which in a pessimistic scenario, reduce from extreme to medium and low, which may indicate that SAFs are adaptable to future changes. These results are relevant and call attention to the adoption of measures to avoid more critical climate change scenarios for the Amazon region.

Key-words: biomimetics; vegetation Index; future climate scenarios; safe operational climate space.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Impactos das ações do Plano ABC em sistemas agroflorestais (SAF) e efeitos sobre a capacidade de adaptação às mudanças climáticas.....	17
Figura 2 - Localização da área de estudo no Município de Tomé-Açu, Pará, Amazônia, Brasil.....	27
Figura 3 - Estrutura metodológica da pesquisa.....	28
Tabela 1 - Descrição dos tipos e sensores utilizados na pesquisa.....	29
Figura 4 - Comportamento e médias de EVI, desvio padrão e tendência linear para Florestas (FOR) e Sistemas Agroflorestais (AFS).....	34
Figura 5 - Comportamento da biomassa acima do solo (ton.ha-1) para florestas primárias e sistemas agroflorestais nos anos de 2010 e 2017 a 2020.....	35
Figura 6 -Mapeamento das variáveis de: (a) médias de EVI; (b) desvio padrão e; (c) tendência linear para SAFs.....	36
Figura 7 - Análise Gráfica da média de EVI em serie temporal de 21 anos (2000-2020) para Florestas e SAF de Tomé-Açu.....	37
Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo, SAFs do município de Tomé-Açu, Pará.....	54
Figura 9 – Etapas metodológicas da Pesquisa.....	55
Figura 10 - Temperatura Média Anual (BIO1) nos cenários atual, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, nos períodos de 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.....	58
Figura 11 - Precipitação Acumulada (BIO12) nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os períodos atual, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.....	59
Figura 12 - Sazonalidade da Precipitação (BIO15) nos cenários SSP2-4.5 E SSP5-8.5 para os períodos atual, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.....	60
Figura 13 – Espaço Climático de Segurança em período atual em comparação a cenários SSP2-4.5 E SSP5-8.5 para os períodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.....	61
Figura 14 - Avaliação da exposição dos SAFs baseada nas BIO12 e BIO15, em mapa bivariado.....	62

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL	10
1.1 Fundamentação teórica da Dissertação	13
1.1.1 Ações antrópicas, mudanças de uso e cobertura da terra e as consequências climáticas.....	13
1.1.2 Sistemas Agroflorestais e suas potencialidades.....	15
1.1.3 Capacidade adaptativa dos SAFs frente as mudanças climáticas futuras.....	16
1.2 Histórico da Área de Estudo	18
1.3 Hipóteses	19
1.4 Justificativa e Interdisciplinalidade da Pesquisa	19
1.5 Objetivo Geral	15
1.5.1 Objetivos específicos.....	15
1.6 Estrutura da Dissertação	15
CAPÍTULO 2 AVALIANDO A CAPACIDADE DOS SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE IMITAR FLORESTAS COM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO NA AMAZÔNIA	23
2.1 Introdução	24
2.2 Material e Métodos	26
2.2.1 Área de estudo.....	26
2.2.2 Cálculo do Índice de Vegetação Aprimorada (EVI).....	28
2.2.3 Biomassa acima do solo (AGB).....	28
2.2.4 Processamento de dados de computação em nuvem com o Google Earth Engine.....	29
2.2.5 Classificação dos SAFs.....	31
2.2.6 Validação das áreas de SAFs.....	32
2.2.7 Classificação das Florestas.....	32
2.2.8 Análise estatística.....	33

2.3 Resultados	33
2.4 Discussão	37
2.4.1 Comportamento do EVI ao longo do tempo.....	37
2.4.2 Análise de Biomassa acima do solo.....	38
2.4.3 Análise Espacial dos SAFs.....	39
2.4.4 Análise espaço-temporal.....	39
2.5 Conclusão	40
CAPÍTULO 3 AVALIAÇÃO DO RISCO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE OS SISTEMAS AGROFLORESTAIS NA AMAZÔNIA	50
3.1 Introdução	51
3.2 Material e Métodos	53
3.2.1 Área de estudo.....	53
3.2.2 Classificação das áreas de SAFs	54
3.2.3 Validação das áreas de SAFs.....	55
3.2.4 Dados climáticos	56
3.2.5 Clima atual e futuro.....	56
3.2.6 Nível de exposição ao clima futuro.....	56
3.2.7 Análise estatística.....	57
3.3 Resultados	57
3.4 Discussão	62
3.4.1 Mudanças climáticas e seus impactos sobre os sistemas agroflorestais.....	62
3.4.2 Espaço operacional climaticamente seguro para os SAFs.....	64
3.4.3 Exposição dos SAFS a cenários não-análogos.....	65
3.5 Conclusão	65
CAPÍTULO 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
REFERÊNCIAS	72

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

Dados do Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD) do Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon) demonstram que a floresta amazônica perdeu 1.078 hectares entre 2021 e 2022. A maior devastação dos últimos 15 anos, sendo 3% maior que a do ano anterior (Imazon, 2021). Em 2021, a maior perda de floresta nativa ocorreu no Brasil, correspondente a 40% da perda mundial (Weisse; Goldan, 2021). O país perdeu cerca de 1,5 milhão de hectares das chamadas florestas tropicais primárias, com maior concentração na região Norte (Global Forest Watch, 2022).

As mudanças de uso da terra na Amazônia afetam as mudanças climáticas globais, sobretudo pela conversão de ecossistemas naturais em pastagens ou monocultivo, ocasionando consequências como a intensificação do efeito estufa, a redução da evapotranspiração, que na época seca diminui o suprimento de água para a atmosfera (Fearnside; Barbosa; Pereira, 2013), incluindo o aumento do albedo da superfície, entre outros. Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2022), há evidências de efeitos negativos expressivos das mudanças climáticas sobre a saúde humana, os ecossistemas, a biodiversidade, os recursos hídricos e o regime de chuvas, a produção agropecuária, afetando a abundância e interações da vida na Terra (Imazon, 2021).

Essa perda é especialmente preocupante, uma vez que estudos demonstram que a floresta amazônica está perdendo resiliência, estando mais perto de um ponto de inflexão (Lovejoy; Nobre, 2019), sentido pelas reduções recentes na precipitação (Barkhordarian *et al.*, 2019) e até mudanças na composição da floresta nos últimos 30 anos (Esquivelmuelbert *et al.*, 2019). Evidencia-se, assim, que as mudanças climáticas globais compõem o principal desafio a ser enfrentado no século XXI, pois seus impactos, em geral negativos, serão sentidos distintamente entre as diversas atividades econômicas e localidades ao redor do planeta (Schembergue *et al.*, 2017).

É necessário um esforço conjunto, tanto no desenvolvimento de novas tecnologias quanto na implantação de sistemas e ações que promovam a convergência entre o aumento da produção sustentável de alimentos e de energia e as ações de mitigação frente às mudanças climáticas, para assim garantir a manutenção da qualidade de vida da sociedade atual e futura (Brasil, 2012).

Nesse contexto, a implantação e difusão de Sistemas Agroflorestais (SAFs)

proporcionam condições ambientais favoráveis por serem baseados em fundamentos de sistemas sucessionais e perspectiva agroecológica, sendo uma prática que pressupõe a potencialização da regeneração natural (Favero; Lovo; Mendonça, 2008). Silva (2002), relata que a essência analógica desses sistemas se assemelha e imita a natureza, criando consórcios com composições diferentes, que serão determinados por uma procedência e continuidade.

Dessa forma, os SAFs potencializam o processo natural de decomposição da matéria orgânica, acúmulo de serrapilheira e troncos de árvores, abertura de clareiras e demais componentes, de modo que acumulam qualitativamente e quantitativamente fertilidade para o solo, diversidade, complexidade e energia vital para a transição gradual de um estágio para o outro (Gandolfi *et al.*, 2007; Bolfe, 2010). Para Bolfe *et al.* (2012), esses sistemas resultam em co-benefícios nonexo água-energia-terra-alimento, com resultados positivos observados no manejo do solo, diversificação de culturas, eficiência hídrica e fontes alternativas de energia (Beenhouwer *et al.*, 2013; Elagib; Al-Saidi, 2020).

Segundo o IPCC (2022), quando adaptadas localmente a variações ecológicas e sociais de pequena escala, as iniciativas agroflorestais podem melhorar a renda familiar e fornecer emprego regular e meios de produção sustentáveis para as comunidades locais. É válido mencionar que no município de Tomé-Açu/PA estes sistemas tornaram-se modelo em termos de exploração agrícola sustentável, principalmente pelo histórico de uso e ocupação do município, marcado por intensa remoção da cobertura florestal nativa – provocada pelos sucessivos processos de derrubada e queimada. Atualmente, a agricultura é a base da economia e com significativa importância social e ambiental para o estado do Pará (Bolfe, 2010).

No tocante as mudanças climáticas, os SAFs são mencionados como estratégia adaptativa, pois quanto mais diversificado o sistema agrícola, maior a sua função ecossistêmica, o que pode torná-los menos susceptíveis as variações do clima (Assad *et al.*, 2019). No entanto, a adaptação e capacidade de resiliência desses sistemas aos futuros e frequentes eventos climáticos extremos provocados por atividades humanas irracionais (Abdulai *et al.*, 2018), podem ter diretamente afetadas as funções do agroecossistema (Marsden; Martin-Chave; Cortet, 2020). Nesse contexto, a capacidade dos ecossistemas agroflorestais de manter operações e serviços no longo prazo, sua estrutura e estabilidade são os fatores fundamentais mais significativos que requer pesquisas mais completas e aprofundadas para fortalecer a compreensão de quão bem os SAFs funcionarão em climas não análogos.

Nessa perspectiva, as projeções de modelos climáticos globais (GCMs) são utilizados para

estudos sobre mudanças climáticas, contribuindo para prever características gerais do clima futuro, constituindo uma importante informação para os estudos de impactos de mudanças climáticas em larga escala, a médio e longo prazo (Marengo, 2007).

Os cenários futuros de mudanças climáticas são representados por meio de emissões futuras de Gases de Efeito Estufa (GEE) baseados em um conjunto de suposições coerentes e fisicamente consistentes sobre suas forçantes radioativas, tais como demografia, desenvolvimento sócio-econômico, mudanças tecnológicas, assim como considera a alteração dos valores de temperatura, precipitação, umidade, ventos, entre outros.

O relatório do IPCC (2022) contempla cenários que incluem o sequestro de carbono, conhecidos como os SSPs (*Shared Socio-Economic Pathways*), com projeções para períodos de 20 em 20 anos (2040, 2060, 2080 e 2100). Essas projeções indicam que até o final do século XXI, o continente sofrerá principalmente com condições climáticas não-análogas, com pouca sobreposição com as condições climáticas atuais (Garcia *et al.*, 2014; Williams; Jackson; Kutzbach, 2007).

Logo, entender a distribuição e a dinâmica da vegetação por meio de investigações das variações espaciais e temporais pode ajudar a compreender a relação entre o comportamento da vegetação e as mudanças climáticas (Johnson *et al.*, 2016), bem como a contribuição dos SAFs no ciclo global do carbono, pela análise da distribuição espacial da biomassa acima do solo (Brienen *et al.*, 2015), necessária para avaliar a contribuição desses sistemas enquanto fonte e sumidouro de carbono e compreender os efeitos das mudanças climáticas globais na estrutura e composição da vegetação.

Existe uma ampla disponibilidade de dados de diversas fontes (sensores remotos, coleções científicas, entre outras), a maioria disponível on-line, que medem diversos atributos do ambiente físico e do funcionamento dos ecossistemas (Foody *et al.*, 2015). Para desenvolvimento desta pesquisa, destacamos o uso do Sensoriamento Remoto por possibilitar técnicas de monitoramento da dinâmica espaço-temporais da fenologia da vegetação em escala global e regional, especialmente pelo aumento da acessibilidade aos dados através do uso de índices de vegetação.

Os índices de vegetação apresentam-se como instrumentos potenciais para avaliar e monitorar as condições da cobertura vegetal de uma região geográfica, em função de sua precisão, praticidade e caráter multiespectral (Sallo *et al.*, 2014). Diversos tipos de índices de vegetação e seus derivados são encontrados na literatura, porém, para a abordagem desta

pesquisa, optou-se pelo *Enhanced Vegetation Index* (EVI) que é uma variante do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e foi desenvolvido para minimizar os efeitos tanto do solo quanto das influências de sinal de fundo do dossel e da atmosfera, sendo mais sensível regiões de alta biomassa (Huete *et al.*, 2002; Justice *et al.*, 1998). A biomassa, por sua vez, pode ser verificada a partir de dados fornecidos pela *European Space Agency* (ESA, 2021).

Quantificar a distribuição espacial da biomassa a nível local em SAF é importante para reduzir as incertezas quanto às estimativas das emissões e remoções de carbono, bem como compreender como tais fenômenos atuam, tanto nos processos ambientais quanto na sustentabilidade do sistema (Foody, 2003). Desse modo, o estudo da estimativa de biomassa em SAF é relevante no planejamento para um uso sustentável dos recursos naturais, entendimento da inserção dessa atividade sobre o ciclo do carbono e consequentemente manutenção de carbono como biomassa pela atividade produtiva (Pereira Neto, 2012).

Embora a literatura apresente inúmeras vantagens proporcionadas pelos SAFs, ainda há carência de informações sobre as potencialidades desses sistemas. Portanto, considerando o contexto e importância da temática sintetizada acima, o objetivo desta pesquisa é avaliar a dinâmica da cobertura vegetal e o comportamento da biomassa acima do solo dos sistemas agroflorestais em série temporal de 20 anos, assim como analisar os efeitos das mudanças climáticas futuras (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e consequente resiliência dos SAFs a climas não-análogos, para assim reconhecê-los ou não como medida de mitigação e estratégia adaptativa frente as mudanças climáticas, a partir de estudo no Município de Tomé-Açu, Pará.

1.1 Fundamentação Teórica da Dissertação

1.1.1 Ações antrópicas, mudanças de uso e cobertura da terra e as consequências climáticas

As alterações ambientais provocadas pela intensificação das ações antropogênicas estabeleceram o surgimento de uma nova era geológica, o ‘Antropoceno’, que retrata a mudança global climática, declínio da biodiversidade, alteração dos ciclos biogeoquímicos globais e extração de recursos em larga escala e produção de resíduos (Malhi, 2017). Embora o conceito do Antropoceno não seja sinônimo de mudança climática, este inclui uma sequência de crises ambientais, que associadas ao fenômeno do aquecimento global gera grande preocupação (SQS, 2009).

Artaxo (2014) relata que o avanço industrial e a intensificação do uso de combustíveis

fósseis elevou a concentração de Dióxido de Carbono (CO₂) na atmosfera, que passou de cerca de 280 ppm, na era pré-industrial, para uma concentração média de 399 ppm, em 2015. Essa concentração não havia sido observada ao longo dos últimos 800 mil anos. Esse novo ritmo potencializou o efeito estufa, provocando conseqüentemente desequilíbrios climáticos e geológicos globais.

O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG (2020), demonstrou que a maior parte das emissões brutas de CO₂ (93%) são causadas por alterações no uso do solo. Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2019), a agricultura é um dos principais contribuintes para as emissões líquidas de CO₂, devido à devastação de sumidouros de CO₂ (florestas e solos orgânicos); e é também a maior emissora de metano e Óxido Nitroso (N₂O) para a atmosfera (*Agriculture, Forestry and Other Land Uses - AFOLU*).

Em 2016 mais de 70% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) do Brasil originaram-se das emissões da agricultura e da mudança do uso da terra, tendo como principal motor o desmatamento e a degradação da vegetação nativa no país (SEEG, 2018). Fato que elevou o Brasil ao segundo lugar no ranking de países com maiores perdas de cobertura arbórea, entre 2001 e 2017 (Hansen *et al.*, 2018).

O primeiro relatório do IPCC concluiu que as atividades antrópicas que emitem gases de efeito estufa estavam aumentando de forma substancial, com a média de elevação da temperatura em 0,3° C por década (IPCC, 1988). E o último relatório destaca que se o crescimento das emissões de GEE se mantiverem, o planeta chegará a um aquecimento de 2,8 °C até 2100. Sendo de extrema urgência limitar o aumento das temperaturas, reduzindo as emissões anuais de CO₂ em 48% até 2030 e zerá-las até 2050 (IPCC, 2022). Do contrário, as mudanças climáticas poderão afetar a produção e a produtividade agrícola mundial, colocando em risco expectativas de crescimento, uma vez que esse setor é altamente dependente do clima (Ray *et al.*, 2015).

Observa-se, assim, que a variabilidade e os acontecimentos climáticos constituem uma ameaça e devem servir de estímulo para acelerar os esforços, não somente para reduzir as emissões de GEE, mas também para combater outros fatores de risco subjacentes, como desenvolvimento urbano não planejado, vulnerabilidade social, degradação ambiental e falhas nos alertas preventivos (Unisdr; Cred, 2015).

Considerando o cenário atual de grandes mudanças ambientais globais, inicia-se um

desafio para a humanidade, a busca da sustentabilidade em suas ações, como a necessidade de novos caminhos para a agricultura. Em sistemas agrícolas adaptar implica adotar práticas de manejo que aproveitem a biodiversidade, os serviços ecossistêmicos e os processos ecológicos de biomas naturais ou modificados, como base para ajudar a aumentar a capacidade das culturas e da pecuária de se adaptar às mudanças e às variações climáticas (Assad *et al.*, 2019).

Nessa perspectiva, poucas são as opções em que ganhos de produtividade estão associados à maior diversidade agrossistêmica. Os sistemas mais conhecidos e adotados hoje no Brasil são: integração lavoura-pecuária-floresta, integração pecuária-floresta, integração lavoura-floresta e os sistemas agroflorestais. Esses sistemas são bem conhecidos e estudados e fazem parte diretamente das ações da agricultura ABC (Dikmen, 2014). Entretanto, considerando uma estratégia de resiliência e adaptação socioambiental, um destaque especial deve ser dado aos SAFs: a) eles apresentam alta capacidade de adaptação e b) possuem grande potencial de adoção pelos 3,8 milhões de pequenos agricultores brasileiros que se encontram na faixa de extrema pobreza ou baixa renda (Manzatto, 2020).

1.1.2 Sistemas Agroflorestais e suas potencialidades

Segundo Batish *et al.* (2008), Altieri e Nicholls (2011), os Sistemas Agroflorestais (SAFs) são sistemas de uso da terra que integram espécies perenes lenhosas com culturas agrícolas e/ou animais, em alguma forma de arranjo espacial ou sequência temporal. Contendo, entre as espécies componentes do consórcio, pelo menos uma espécie tipicamente florestal, independentemente da mesma ser nativa ou não, de porte arborescente ou arbustivo, da existência temporária ou permanente no sistema (May; Trovatto, 2008).

Autores afirmam que há uma ampla variedade de combinações e possibilidades sob a designação "Sistemas Agroflorestais", que diferem quanto aos seus arranjos estruturais, fisionomia, composição florística, papel funcional dos componentes e aspectos ecológicos, manejo do sistema, objetivos da produção e características socioeconômicas predominantes (Engel, 1999; Torquebiau, 2000; Umrani; Jain, 2010).

Na perspectiva agroecológica, os SAFs se apresentam como uma prática que se assemelha e imita a natureza, visto que as plantas e animais vivem em consórcios com outras espécies otimizando sua existência e reprodução. Para Bolfe *et al.* (2012), esses sistemas complexos funcionam como importantes componentes do mosaico de uso e cobertura da terra

existente na Amazônia, pois se apresentam como uma proposta com ampla potencialidade de substituição das áreas desflorestadas (Pereira Neto, 2012), devido sua capacidade de retardar ou reverter a degradação do solo e garantir renda por meio do fornecimento de benefícios ecológicos (Schembergue *et al.*, 2017).

Montagnini e Nair (2004) destacam os SAFs por serem eficientes no sequestro e armazenamento de carbono atmosférico nos compartimentos de biomassa e serrapilheira (Froufe *et al.*, 2011), podendo estar compartimentado de 45-55% na biomassa acima do solo dependendo do estágio de desenvolvimento das árvores (Qureshi; Pariva; Hussain, 2012), visto que plantações jovens fixam mais carbono que florestas primárias e plantios maduros, que já atingiram um estágio de equilíbrio de absorção de carbono e liberam a mesma quantidade na decomposição (Houghton, 1994; Arevalo; Alegre; Vilcahuaman, 2002). Assim, a dinâmica fotossintética diferenciada desses sistemas em função tanto do arranjo das espécies quanto pelas condições edafoclimáticas do local, resultam em classes distintas de estoque de carbono pela emissão ou sequestro da atmosfera (Brown, 1997).

Compreender a estrutura e dinâmica desses sistemas pode ser uma forma de se pensar o planejamento de estratégias de conservação e restauração, associadas a alternativas socioeconômicas e adaptadas localmente visando a segurança alimentar e meios manutenção de espécies e funções ecológicas que forneçam serviços ambientais, que satisfaçam necessidades culturais, estéticas e recreativas das populações humanas (O'Farrell; Anderson, 2010).

1.1.3 Capacidade adaptativa dos SAFs frente as mudanças climáticas futuras

Resultados apresentados pela WRI BRASIL quanto a estratégia para adaptação às mudanças climáticas no setor agropecuário sob ações previstas no Plano ABC e no Planaveg, evidenciam que os SAFs são adequados à agricultura brasileira, pois proporcionam riscos menores, por promoverem diversos serviços ecossistêmicos, como manutenção de água no solo, maior riqueza e magnitude de ciclos biogeoquímicos, sequestro carbono, proteção dos polinizadores, proporcionando aumento e diversidade de produção e de renda aos agricultores (Assad *et al.*, 2019),

Os benefícios promovidos pelos SAFs os tornam interessantes na redução das emissões líquidas GEE e adaptação pela redução da vulnerabilidade humana ao aumento da variabilidade climática e tendências de aquecimento global (Durguma *et al.*, 2014; Harley *et al.*, 2014), uma

vez que, o aumento da cobertura de árvores em paisagens agrícolas armazena carbono (ZOMER *et al.*, 2016; Rosenstock *et al.*, 2019) e modifica microclimas (Van Noordwijk *et al.*, 2014). Dessa forma, estima-se que os SAFs proporcionem efeitos positivos sob os efeitos esperados de clima e eventos extremos como ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Impactos das ações do Plano ABC em sistemas agroflorestais (SAF) e efeitos sobre a capacidade de adaptação às mudanças climáticas.



Fonte: Ações do Plano ABC (2019); Assad *et al.* (2019).

Os sistemas agroflorestais, quando bem manejados, podem aliviar os efeitos das mudanças climáticas projetadas, modificando o microclima, sem diminuir a produtividade do cultivo (Gomes *et al.*, 2020). Embora estudos tenham mostrado os benefícios dos sistemas agroflorestais no microclima em locais específicos, a eficácia dos sistemas agroflorestais para mitigar os efeitos das mudanças climáticas pode diferir de acordo com a localização geográfica e altitude (Lin, 2007; Souza *et al.*, 2012).

1.2 Histórico da Área de Estudo

A região amazônica, na década de 1920, passou por crise econômica severa e uma medida tomada pelos governos do Amazonas e Pará para se sobressaírem, foi a de incentivos e concessões ao capital nacional e estrangeiros a quem estava sob impacto da depressão econômica. Segundo Yamada (2009), tais ofertas chamaram a atenção imediata do governo japonês, que se dirigiram à região para identificar áreas melhores para instalar colônias agrícolas e, a partir delas, dinamizar a economia, através do desenvolvimento de novas culturas e práticas de cultivo (Homma, 1998; Homma, 2005).

Assim, em 1929, fundou-se a colônia japonesa em Tomé-Açu, numa concessão de um milhão de hectares, cedidos pelo governo paraense à Companhia Nipônica de Plantação do Brasil, que teve como missão principal implantar um projeto de desenvolvimento rural na Amazônia, mais próspero que os que vinham sendo implantados pela Ford dos EUA. O que desencadeou o desenvolvimento agrícola na região de Tomé-Açu, especialmente em 1933, com plantio de mudas de pimentas do reino, que foram trazidas de Singapura para o campo experimental da companhia de Tomé-Açu. A partir da década de 50 desenvolvimento dessa cultura se intensificou, e ainda hoje o município é conhecido como a “A terra da Pimenta”. Nesta mesma década foi fundada a Cooperativa de Hortaliças do Acará, por iniciativa própria dos colonizadores, a qual foi a célula-mãe da Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu – CAMTA (Camta, 2021).

Algum tempo mais tarde, na década de 60, o preço da pimenta oscilou no mercado mundial e a partir de 1970, houve o declínio do ciclo da pimenta-do-reino, acentuado por questões fitossanitárias (fusariose). E a saída dos imigrantes dessa “crise ecológica” foi a diversificação das atividades a partir da década de 70, dando destaque para a fruticultura, em especial, mamão hawai, melão, acerola, laranja, dendê, cupuaçu, maracujá, entre outras frutíferas nativas e exóticas, o que gerou um novo ciclo econômico para a região (Homma, 1998).

Essa diversificação das culturas foi associada a um novo sistema de produção, o sistema agroflorestal, o qual se desenvolveu gerando diferentes arranjos produtivos com as diferentes espécies e promovendo a inserção dos produtores rurais em novos mercados. E ao final de 1996, estavam instalados nos campos principais de 6600 ha (excluindo quintais), 70 espécies arbóreas em 300 combinações diferentes (Yamada, 2009).

Atualmente, são mantidas no município inúmeras áreas com SAFs mantendo o

desenvolvimento da região. Os SAFs implantados possuem grande variedade de espécies frutíferas e madeireiras. As espécies frutíferas são cultivadas e processadas industrialmente pela CAMTA (principalmente na forma de polpa) várias frutas tropicais nativas e exóticas, destacando-se: açaí (*Euterpe oleracea* Mart.), cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum), graviola (*Annona muricata* L.), maracujá (*Passiflora edulis* Sims), caju (*Anacardium occidentale* L.), abacaxi (*Ananas comosus* (L.) Merrill), taperebá (*Spondias mombin* L.), goiaba (*Psidium guajava* L.), acerola (*Malpighia glabra* L.), muruci (*Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth), cacau (*Theobroma cacao* L.), carambola (*Averrhoa carambola* L.), dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.), andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.), ypê (*Handroanthus* spp. Mattos), Mogno (*Swietenia macrophylla* King); Sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess), pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.), cedro (*Cedrela odorata* L.), Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby).

Embora os aspectos históricos do município envolvam intensos processos de desmatamento, a conversão para cultivos diversos, por meio da tecnologia de SAFs, foi adotada com sucesso, impulsionando e dinamizando a economia regional. Os SAFs têm uma importância social e econômica significativa para o município. Além do mais, a região apresenta mosaico de vários estágios de ecossistemas florestais sucessionais, e por essas razões o município de Tomé-Açu foi escolhido como área de estudo para esta pesquisa.

1.3 Hipóteses

- Sistemas Agroflorestais são capazes de mimetizar em estrutura e funcionamento ecossistemas naturais?
- Sistemas Agroflorestais apresentam-se resilientes frente as mudanças climáticas futuras até o final do século?

1.4 Justificativa e Interdisciplinalidade da Pesquisa

O funcionamento dos ecossistemas está sendo fortemente afetado pelas mudanças climáticas, não somente em nível global, mas também regional e até mesmo local. Tal é a dimensão das alterações determinadas pela ação humana no planeta, que a comunidade científica considera esta como uma nova era geológica, o Antropoceno, que está alterando profundamente a relação homem-natureza (Artaxo, 2020).

Essas alterações já estão prejudicando os sistemas alimentares e florestais, com consequências negativas para a agricultura, a silvicultura, a pesca e a aquicultura, dificultando cada vez mais os esforços para atender às necessidades humanas (IPCC, 2022). Observa-se que é fundamental desenvolvermos uma ciência que contribua para alcançarmos uma sociedade sustentável ao longo das próximas décadas, conciliando preservação do meio ambiente com desenvolvimento econômico e justiça social (Artaxo, 2020).

Um dos caminhos promissores para alcançar este objetivo é a adoção de estratégias de adaptação às mudanças climáticas, e uma alternativa viável é a adaptação baseada em ecossistemas. De acordo com Vignola *et al.*, (2015), a adaptação pode ser vista como um processo para promover a manutenção ou a adoção de práticas de gestão baseadas na ecologia que podem fornecer resultados positivos, além de serem capazes de reduzir o risco climático em todos os setores, proporcionam co-benefícios sociais, econômicos e ambientais, demonstrando a dependência humana direta de serviços ecossistêmicos, agricultura de conservação e manejo sustentável de terra (Schwab *et al.*, 2014)

Os sistemas agroflorestais promovem diversos serviços ambientais, com grande relevância para o sequestro e fixação de carbono, alinhado as necessidades de adaptação e mitigação das mudanças climáticas (Somarriba *et al.*, 2013; IPCC, 2022). Diante das potencialidades desse sistema, em conservação de recursos naturais, aumento de produtividade e geração de renda, cabem como estratégia adaptativa. No entanto, a adoção destes ainda é muito incipiente, sobretudo no Brasil, devido a diversos fatores, como a falta de conhecimento técnico da prática de SAFs, burocracias para obtenção de créditos fiscais, a complexidade na modelagem de impactos climáticos em SAFs em comparação com sistemas de cultivo único, o que sugere incerteza associada às estimativas de estoque de carbono em sistemas muito heterogêneos (Houghton *et al.*, 2012; Observatório ABC, 2015).

Dessa forma, este estudo se justifica pelo potencial em contribuir cientificamente reduzindo as incertezas quanto a segurança e capacidade dos SAFs serem resilientes frente as mudanças climáticas, gerando informações que auxiliem e condicionem não apenas a permanência, mas também o desenvolvimento destes sistemas. Concomitantemente, a quantificação e qualificação que esses sistemas podem servir de subsídio na elaboração e implementação de políticas públicas que incentivem ainda mais a implantação de tecnologias e práticas de baixo carbono em setor específico (agricultura), que podem acelerar a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e consequentemente implantação de infraestrutura resiliente ao clima.

No campo da colaboração teórica, esta pesquisa busca corroborar com os estudos já feitos sobre a temática, no que tange aos SAFs como estratégia de resiliência, na compreensão e esclarecimento sobre seu papel na adaptação às mudanças climáticas e as maneiras diferenciadas pelas quais estes sistemas podem contribuir nos contextos biofísicos e geográficos. Além disso, ressalta-se a deficiência na discussão do tema podendo citar: distribuição geográfica desigual dessa temática e a baixa compreensão dos seus benefícios durante riscos climáticos específicos voltados à região amazônica, pela literatura.

É pertinente enfatizar que uma motivação adicional à elaboração da proposta trata-se da experiência prévia com sistemas agroflorestais, obtida em pesquisas de iniciação científica e trabalho de conclusão de curso, associadas à análise físico-químicas do solo nesses sistemas.

1.5 Objetivo Geral

Avaliar a dinâmica da cobertura vegetal e o comportamento da biomassa acima do solo dos sistemas agroflorestais em série temporal de 20 anos, assim como analisar os efeitos das mudanças climáticas futuras (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e conseqüente resiliência desses sistemas a climas não-análogos, a partir de estudo no Município de Tomé-Açu, Pará.

1.5.1 Objetivos Específicos

- I. Avaliar se os SAFs conseguem mimetizar ecossistemas naturais em sua estrutura, assim como avaliar a estabilidade e funcionalidade ecossistêmica desses sistemas em série temporal de 20 anos, no município de Tomé-Açu.
- II. Avaliar a exposição dos SAFs do município de Tomé-Açu às mudanças climáticas futuras, considerando o aumento da Temperatura Média Anual (BIO1) e a variação na disponibilidade de água (BIO12 e BIO15), em uma abordagem de EOCS.

1.6 Estrutura da Dissertação

A estrutura organizacional desta dissertação segue a normativa estabelecida pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) e está dividida em quatro capítulos. O Capítulo 1 é introdutório, sendo composto pela Introdução Geral, Referencial Teórico, Justificativa e Interdisciplinaridade da Pesquisa. O Capítulo 2 tem como base os objetivos específicos 1 e 2 da dissertação, em função da primeira hipótese, de que os sistemas agroflorestais são capazes de mimetizar ecossistemas naturais em estrutura e funcionamento, através de análise espaço-temporal da vegetação e biomassa acima do solo, com ênfase particular sobre SAFs do município de Tomé-Açu. O Capítulo 3 tem como base os objetivos

específicos 3 e 4, apresentando análise dos efeitos das mudanças climáticas sobre os sistemas agroflorestais, visando comprovar a hipótese de que sistemas agroflorestais seriam resilientes a climas não-análogos, se apresentando como boa estratégia adaptativa frente às mudanças climáticas. O capítulo 4 trata das conclusões gerais, de maneira integrada aos resultados-chaves dos capítulos 2 e 3.

CAPÍTULO 2 AVALIANDO A CAPACIDADE DOS SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE MIMETIZAR FLORESTAS COM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO NA AMAZÔNIA

Resumo

Sistemas Agroflorestais (SAFs) são formas de uso da terra capazes de sequestrar e estocar carbono em sua estrutura, ao mesmo tempo que asseguram a distribuição de renda e segurança alimentar em paisagens amigáveis à biodiversidade. Diante disso, tal uso da terra tem um grande potencial como medida adaptativa frente às mudanças climáticas. A lógica dessa atividade está amparada no arcabouço teórico da ciência da biomimética, mesmo que de forma intuitiva e não-declarada, onde há uma deliberada intenção de que sistemas produtivos devam imitar ecossistemas naturais em sua estrutura e funcionamento, a fim de otimizar o uso de escassos recursos naturais. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar se os SAFs do município de Tomé-Açu, inseridos no bioma amazônico, são capazes de mimetizar florestas primárias no que diz respeito a sua estrutura e funcionamento ao longo de duas décadas e de maneira espacialmente explícita. Nesse sentido, utilizou-se o Índice de Vegetação Aprimorado (*Enhanced Vegetation Index* - EVI) que é capaz de estimar a estruturas dos ecossistemas naturais e antropizados fornecendo uma medida de produtividade dos ecossistemas naturais e dos agroecossistemas. Utilizando a plataforma *Google Earth Engine* (GEE), calculou-se o EVI para os ecossistemas naturais e agroecossistemas do município de Tomé-Açu de 2000 a 2020. Observou-se que utilizando o EVI não há diferença estatisticamente significativa entre SAFs e Florestas Primárias do município. Os resultados apontam que os SAFs conseguem ser similares do ponto de vista estrutural às florestas maduras, corroborando com estudos que apontam uma similaridade na capacidade de armazenar carbono. Conclui-se assim, que os sistemas agroflorestais representam uma oportunidade para a mitigação sobre o efeito das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Agroecossistemas; EVI; biomimética. resiliência.

Abstract

Agroforestry systems (SAFs) are forms of land use capable of sequestering and storing carbon in their structure, while ensuring income distribution and food security in biodiversity-friendly

landscapes. Given this, such land use has great potential as an adaptive measure in the face of climate change. The logic of this activity is supported by the theoretical framework of the science of biomimicry, albeit in an intuitive and undeclared way, where there is a deliberate intention that productive systems should mimic natural ecosystems in their structure and functioning, in order to optimize the use of scarce natural resources. In this sense, the aim of this study is to assess whether the SAFs in the municipality of Tomé-Açu, located in the Amazon biome, are capable of mimicking primary forests in terms of their structure and functioning over two decades and in a spatially explicit manner. The Enhanced Vegetation Index (EVI) was used to estimate the structure of natural and anthropized ecosystems, providing a measure of the productivity of natural ecosystems and agro-ecosystems. Using the Google Earth Engine (GEE) platform, EVI was calculated for the natural ecosystems and agro-ecosystems in the municipality of Tomé-Açu from 2000 to 2020. It was observed that using EVI there is no statistically significant difference between SAFs and Primary Forests in the municipality. The results show that SAFs are structurally similar to mature forests, corroborating studies that show a similar capacity to store carbon. The conclusion is that agroforestry systems represent an opportunity to mitigate the effects of climate change.

Key-words: Agroecosystems; EVI; biomimicry; climate change; resilience.

2.1 Introdução

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2023) aponta os sistemas agroflorestais (SAFs) como eficazes na adaptação e redução dos riscos climáticos, com base em pesquisas que demonstram grande potencial desses sistemas no sequestro e estoque de carbono tanto pela vegetação quanto no solo (Zomer *et al.*, 2016; Smith *et al.*, 2019; Cardozo *et al.*, 2022), uma vez que os sistemas de cultivo arbóreo têm a capacidade de absorver o dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera acima do solo, pelos troncos, galhos e folhas, reduzindo o impacto do aquecimento global e apoiando o microclima (Lorenz; Lal, 2010; Patil; Kumar, 2017).

A estrutura agroflorestal é uma das principais formas de melhorar o ambiente do ecossistema e aumentar sua sustentabilidade e resiliência ao mesmo tempo que garante a rotação

de culturas na estrutura temporal (Nair *et al.*; Hu *et al.* 2006). Dessa forma, são considerados uma das opções mais promissoras para manter a cobertura arbórea e conservar a diversidade e conectividade em paisagens agrícolas, mantendo a produção agrícola (Schroth *et al.*, 2004), promovendo a segurança alimentar e nutricional, estabilidade econômica, integridade ecológica e provisionamento de serviços ecossistêmicos (Garrity, 2006; Somarriba; Beer, 2011; Meybeck, *et al.*, 2020).

Todos os benefícios biofísicos desses sistemas se devem a sua fundamentação na biomimética, pela qual há deliberada intenção de imitar ecossistemas naturais, oferecendo uma maneira saudável e ecológica, pois apostam na diversidade e se ajustam em forma e função à medida que mantém ou aumentam a produção e reduzem o impacto da atividade econômica na ecologia dos sistemas (Benyus, 1997; Rangel *et al.*, 2012).

Além disso, a composição e estrutura de alguns SAFs, seguem a teoria da sucessão ecológica, de modo que cada conjunto de espécies é inserido em seu respectivo estágio de sucessão, o que contribui para diversificar grupos funcionais, promover o crescimento de árvores e a produtividade das culturas. Desta forma, o processo natural de decomposição da matéria orgânica e acúmulo de serrapilheira são potencializados, promovendo fertilidade para o solo, complexidade e energia vital para a transição gradual de um estágio para o outro (Bolfé; Batistela, 2011; Rey Benayas; Bullock, 2012; Zomer *et al.*, 2016).

De acordo com Zang *et al.* (2016), a vegetação desenvolve papel imprescindível sobre os efeitos das mudanças climáticas, pois é um dos responsáveis por regular e mitigar o aquecimento global, ao interferir no ciclo do carbono terrestre, na troca e equilíbrio de água/energia de superfície. Nessa lógica, os SAFs com seus diversificados cultivos permitem altas densidades de árvores, possibilitando maior acúmulo e volume de biomassa aérea, principalmente devido ao componente arbóreo, que cria estratos vegetais que influenciam significativamente o ciclo do carbono terrestre, a troca e equilíbrio de água/energia de superfície e os valores dos serviços ecossistêmicos de escalas regionais a globais (Chu *et al.*, 2019; Quandt *et al.*, 2019; Assad *et al.*, 2020; Winkler *et al.*, 2021).

A complexidade estrutural e a dinâmica da vegetação são os principais fatores que influenciam o potencial produtivo e ecológico dos SAFs (Marais *et al.*, 2022) e que podem ser medidas de maneira indireta através de técnica de sensoriamento remoto (Novo *et al.*, 1998). Convergente a isto, os métodos remotos, obtidos por intermédio do processamento de imagens de satélite, como os índices de vegetação (IVs), com base na análise das curvas de assinatura

espectral da reflectância das folhas, permitem que sistemas de aquisição de dados de sensoriamento remoto transformem a radiação eletromagnética refletida pelos alvos da superfície terrestre em um sinal passível de ser convertido em informações sobre o meio ambiente. Sendo que estes se destacam em meio aos estudos de análise, detecção e monitoramento da cobertura vegetal (Braz *et al.*, 2015; Martins *et al.*, 2021).

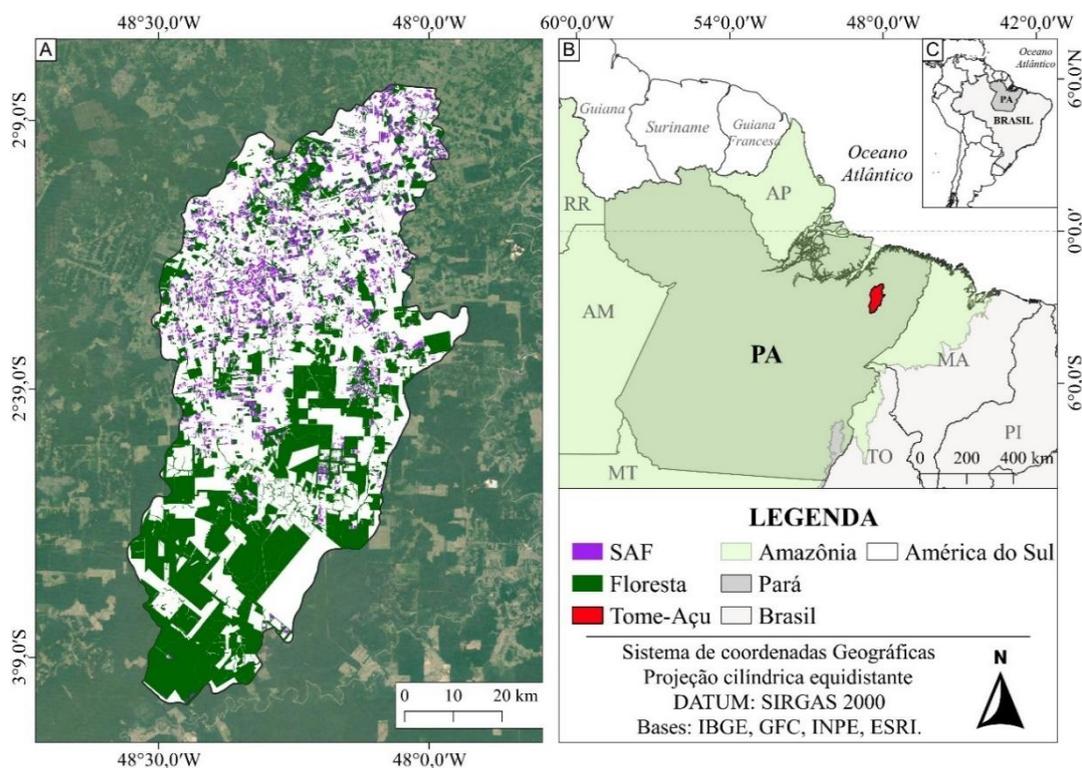
No mais, de acordo com estudo recente de Quandt *et al.* (2023), mais pesquisas são necessárias para entender as maneiras diferenciadas pelas quais os sistemas agroflorestais podem contribuir para a atenuação das alterações climáticas e nos contextos socioeconômicos, biofísicos e geográficos. Dessa forma, são necessárias evidências suficientemente fortes de que os SAFs conseguem alcançar esses objetivos. Desta forma, esta pesquisa com base em análise de sensoriamento remoto, objetiva avaliar se os SAFs conseguem mimetizar ecossistemas naturais em sua estrutura, assim como avaliar a estabilidade e funcionalidade ecossistêmica desses sistemas em série temporal de 20 anos, no município de Tomé-Açu.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Área de estudo

A pesquisa tem como área de estudo o município de Tomé-Açu, localizado na Mesorregião Nordeste Paraense, posicionada nas coordenadas geográficas: 2°25'00" S e 48°09'09" W (Figura 2). Possui área territorial de 5.145,361 km² e população de 60.604 habitantes (IBGE, 2021).

Figura 2 - Localização da área de estudo no Município de Tomé-Açu, Pará, Amazônia, Brasil.



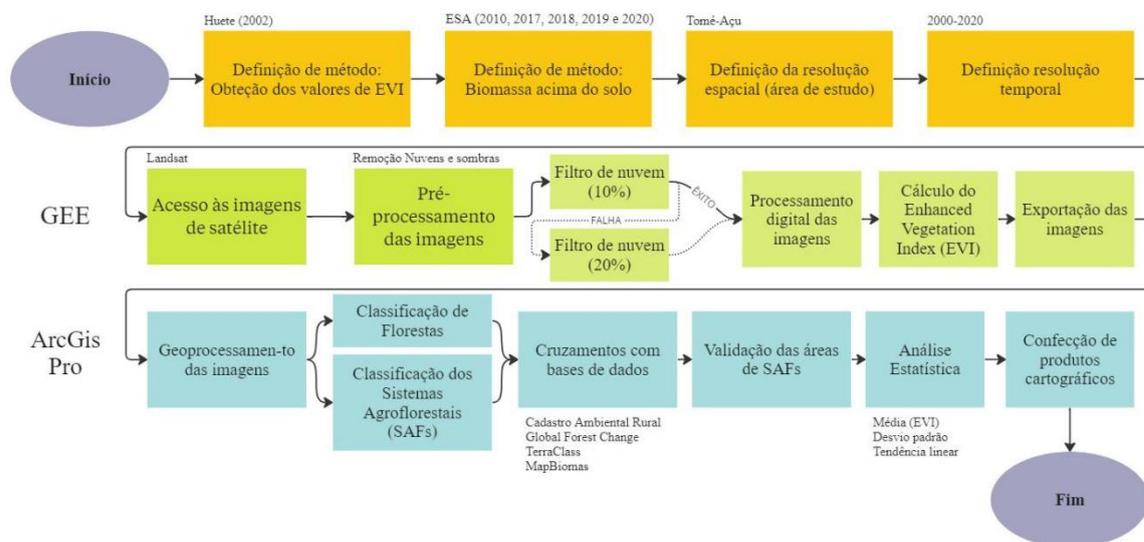
Fonte: Elaborado pela autora.

No tocante as características pedológicas, as principais classes de solo mapeadas no Município de Tomé-Açu são: Latossolos Amarelos; Latossolo Vermelho Amarelo, Argissolos Amarelos; Gleissolos e Neossolos (EMBRAPA, 1999). O clima da Região é mesotérmico e úmido, do tipo Ami de acordo com a classificação de Koppen, com estação seca bem definida, temperatura média anual de 26 °C e umidade relativa do ar em torno de 85%. A média anual de precipitação é de 2.300 mm (Bolfe; Batistella, 2011; Alvares *et al.*, 2013).

A região em estudo apresenta três tipos de vegetação: 1) Floresta ombrófila densa das terras baixas; 2) Floresta ombrófila densa aluvial; e 3) Vegetação secundária. Além de áreas de agricultura e pastagem (BDIA, 2021). Apresenta áreas com lavouras que representam cerca de 31,6 mil hectares, sendo 55,3 mil hectares de pastagem, 118 mil hectares de florestas e 14,7 mil hectares de SAFs (Censo Agropecuário, 2017).

Para realização do estudo foram consideradas duas classes de uso e cobertura da terra no município de Tomé-Açu, sendo: Floresta Primária (FOR) e Sistemas Agroflorestais (SAFs) no período de 21 anos (2000-2020), conforme etapas metodológicas descritas abaixo (Figura 3).

Figura 3 – Estrutura metodológica da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

2.2.2 Cálculo do Índice de Vegetação Aprimorada (EVI)

O sensoriamento remoto tem possibilitado estimativas em largas escalas temporais e espaciais, devido uma grande base de dados, tornando possível obter a produtividade do ecossistema em uma resolução temporal alta, como exemplo, o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) (Huete *et al.*, 2002). O EVI diferente de outros índices, minimiza a influência do solo sobre a resposta espectral do dossel da vegetação e reduz a interferência atmosférica, não satura ao avaliar florestas tropicais e outras áreas da superfície terrestre com grandes quantidades de clorofila (Huete *et al.*, 1999; Setiawan; Yoshino, 2010). Apresenta-se significativo para avaliar diferentes tipos de vegetação (Formigoni, Xavier, Lima, 2011), e fornecer indicações sobre verde e cobertura vegetal (área foliar) ao longo do tempo em resposta à energia disponível para fotossíntese e abastecimento de água das plantas, sendo adequado para áreas com vegetação densa e alta biomassa em comparação com outros índices, como o NDVI (Biudes *et al.*, 2022).

2.2.3 Biomassa acima do solo (AGB)

Realizou-se análise da biomassa acima do solo (AGB), que representa a produtividade acumulada através do peso verde ou seco de material vegetal ou volume de material lenhoso de determinado ecossistema, sendo expressa em ton.ha^{-1} (Chisholm *et al.*, 2013 ; Michaletz *et al.*, 2014). Essa variável é fundamental para avaliar e monitorar as mudanças espaço-temporais

dos atributos estruturais e funcionais dos ecossistemas florestais (Pan *et al.*, 2013; Rejou-Mechain, 2017). Adquirimos os dados de AGB pelo programa *Climate Change Initiative* (CCI), da Agência Espacial Europeia (ESA), em arquivo GeoTiff, de acordo com metodologia de Santoro (2021). Para esta análise foram consideradas as áreas de Floresta e Sistemas Agroflorestais do município de Tomé-Açu para os anos de 2010, 2017, 2018, 2019 e 2020.

2.2.4 Processamento de dados de computação em nuvem com o Google Earth Engine

Por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE) (Gorelick, 2017) para processamento digital de imagens, foram obtidos os valores de EVI provenientes de imagens de satélite da missão Landsat, para um período de 21 anos (2000-2020). O quadro abaixo exibe o ano com a indicação do sensor Landsat utilizado:

Tabela 1 - Descrição dos tipos e sensores utilizados na pesquisa

Nome da missão	Sensor	Ano	Resolução Espacial
Landsat 5	TM	2000-2011	30m
Landsat 7	ETM+	2011-2014	30m
Landsat 8	OLI	2015-2020	30m

Fonte: Elaborado pela autora.

O código de programação elaborado e utilizado, em *JavaScript*, contém etapas de definição da resolução espacial e temporal, remoção de agentes interferentes (nuvens e sombras), cálculo do EVI e exportação para o Google Drive, para posterior análise visual e processamento no ArcGIS PRO.

O produto resultante do processamento do GEE foram 20 novas imagens, uma para cada ano da série proposta, com os valores de EVI. As etapas de processamento para obtenção de valores de EVI são descritas a seguir:

1. Definição da resolução espacial: iniciou-se com a definição da área de estudo, município de Tomé-Açu, Pará, Brasil.

2. Definição da resolução temporal: Foi definido o período de 01 de janeiro a 31 de dezembro de cada ano da série temporal analisada (2000-2020). Ou seja, o processamento buscou todas as imagens disponíveis na coleção Landsat, respectiva, para cada ano de análise. As coleções utilizadas foram: LANDSAT/LT05/C01/T1_SR (Landsat 5),

LANDSAT/LE07/C01/T1_SR (Landsat 7) e LANDSAT/LC08/C01/T1_SR (Landsat 8), todas com correção atmosférica.

3. Remoção de agentes interferentes: foi realizada a aplicação de um filtro de nuvem e sombra, que selecionou imagens com o valor mínimo estabelecido de cobertura de nuvem (10%-20%).

4. Cálculo do EVI: O cálculo do EVI foi realizado para as imagens já filtradas e interpoladas, conforme Huete 2002, exibida a seguir:

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} - C_1 \times \rho_{RED} - C_2 \times \rho_{BLUE} + L} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde, G = fator de ganho, geralmente assume valor de 2,5; ρ_{NIR} = refletância do infravermelho próximo (banda B4¹ e B5²); ρ_{RED} = refletância do vermelho (B3¹, B4²); ρ_{BLUE} = refletância na banda espectral do azul (B1¹, B2²); L = ajuste de fundo do dossel vegetal (L=1); C1 e C2 = coeficientes de ajuste da influência dos aerossóis (C1=6; C2=7,5)¹, (Landsat 5 e 7) e ² (Landsat 8).

Os cálculos seguiram as descrições dos códigos de bandas para cada sensor Landsat.

5. Exportação da imagem de EVI: Após processamento na plataforma GEE, para visualização prévia, como adicionar ao mapa o produto gerado, definição de paleta de cores e outros processamentos, as imagens em formato GEO_TIFF foram exportadas para o Google Drive.

6. Análise visual: Foi realizada uma análise visual das imagens geradas, a fim de verificar a qualidade dos dados e a coerência com a realidade local. Essa etapa permitiu identificar possíveis anomalias ou áreas de baixa qualidade nos dados, como buracos deixados por nuvens e sombras, que foram posteriormente corrigidas ou descartadas.

7. O processamento das imagens geradas no GEE, seguiram para seu geoprocessamento no ArcGIS Pro. Assim como, a definição dos valores nas respectivas áreas de Sistemas Agroflorestais (SAFs).

2.2.5 Classificação dos SAFs

Para a identificação das áreas de Sistemas Agroflorestais (SAFs) utilizou-se bases de dados públicas de uso e cobertura da terra. Inicialmente a base do Cadastro Ambiental Rural (CAR), que apresenta áreas consolidadas de imóveis rurais, através da integração de informações ambientais referentes à situação de diversos tipos de áreas, inclusive das áreas de uso restrito e posses rurais do país (Brasil, 2012). Para que fosse atingida as áreas de interesse, realizou-se refinamento, por meio da remoção de áreas degradadas ou desmatadas, utilizando dados do Projeto *Global Forest Change* (GFC) da Universidade de Maryland disponível no endereço eletrônico < <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change> > do método Hansen *et al.* (2013) para o período de 2000 a 2020. Após esse refinamento, realizou-se a sobreposição de bases algumas bases de dados, o TerraClass de 2014, somada a base de dados do MapBiomas (2020) e, por fim, uma classificação semiautomática do Sentinel 2 de 2020 para corroborar com as demais bases de dados.

O TerraClass é um projeto com base em imagens de satélite e informações de campo que apresenta resultados do mapeamento do uso e cobertura da terra na Amazônia Legal até o ano de 2014, (INPE/CRA (2023)). Sendo assim, primeiramente foram obtidos os dados referentes a malha municipal do Brasil, disponibilizado pelo IBGE, restringindo o arquivo para o limite do município de Tomé-Açu. Utilizou-se os mapas temáticos de uso e cobertura da terra do Projeto TerraClass considerados para as órbitas/ponto foram 223/61 e 223/62, que recobrem a área de estudo, considerando apenas o ano de 2014, para a identificação e descontos das florestas primárias e secundárias.

O MapBiomas por ser referência em monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil, produz anualmente mapas de alta resolução da cobertura e uso da terra desde o ano de 1985, por meio de imagens de satélite de diferentes sensores, modelos estatísticos e *machine learning* para realizar a classificação das áreas (Mapbiomas, 2022). Utilizou-se esta base para identificar áreas de monocultura de Dendê que se caracterizam por terem geometria bem definida e áreas extensas (superiores a 100 hectares).

Em termo de escala e resolução espacial o Mapbiomas e TerraClass utilizam imagens de satélites Landsat (30 m), Sentinel (10 m) e MODIS (250 m), essas imagens são capturadas em diferentes resoluções espaciais e espectrais. Há um copilamento das imagens e aplicação de técnicas de classificação para identificar e categorizar diferentes tipos de uso da terra, esses produtos formam uma base de dados e são distribuídos em suas respectivas plataformas. Essas

resoluções implicam em sub ou superestimação das áreas identificadas de SAF. Quanto ao CAR, é um copilado de técnicas de classificação desde o sensoriamento remoto até o georeferenciamento, não possuindo uma escala específica.

Desta forma, com base na resposta espectral dos alvos e nas classificações fornecidas pelas entidades responsáveis pela classificação do uso e cobertura da terra, foram identificadas áreas de floresta primária, floresta secundária, monocultura de dendê e áreas de pastagem e, por exclusão, as áreas remanescentes foram consideradas como SAFs, resultando em 3.646 unidades amostrais, equivalentes a aproximadamente 110 mil hectares. E para garantir a precisão da identificação das áreas de SAFs, realizou-se uma inspeção nas áreas remanescentes para corrigir eventuais erros do cruzamento das bases de dados.

2.2.6 Validação das áreas de SAFs

Com intuito de minimizar erros na classificação das áreas de SAF, localizamos estudos descritos na literatura que identificaram, através de métodos de análise de campo áreas de SAF no município de Tomé-Açu (Miranda; Rodrigues, 1999; Barros *et al.* 2009; Bolfe; Batistela, 2011; Pompeu, 2017; Reis, 2019; Santos *et al.*, 2020; Sousa *et al.*, 2022). Esses estudos foram úteis para compreender a textura e a assinatura das áreas de SAFs, dada sua alta heterogeneidade, as quais não seriam passíveis de classificação automática pelos classificadores tradicionais, sendo a principal limitação deste estudo. Com a combinação dessas bases de dados conseguimos alcançar uma identificação mais precisa das áreas de SAF para a área de estudo.

2.2.7 Classificação das Florestas

Para a identificação das áreas de florestas primárias (FOR) também foi foram utilizados os dados da base do CAR considerando as áreas de vegetação nativa, descontando a base de dados *Global Forest Change* de 2000 a 2020 (Hansen *et al.*, 2013). Obteve-se assim um total de 1.657 unidades amostrais, equivalentes a 111 mil hectares. É válido ressaltar que, a áreas de FOR em hectares é muito superior as áreas de SAF na região estudada, no entanto para termos comparativos, se tratando da análise estatística das classes, foram considerados valores aproximados, para evitar erros na análise.

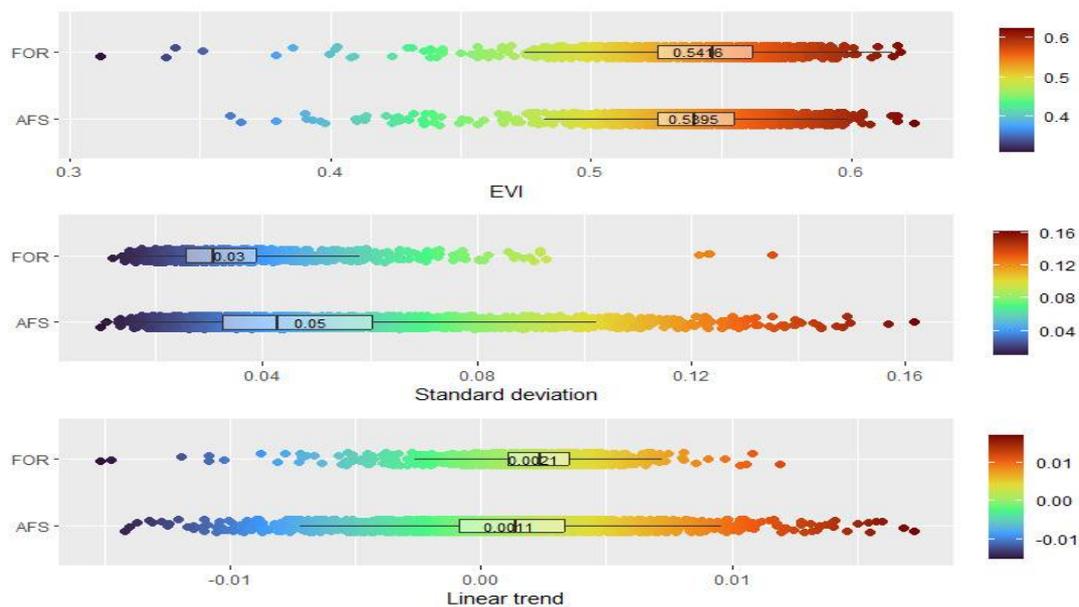
2.2.8 Análise estatística

Os dados foram utilizados para extração dos parâmetros estatísticos por meio do Ambiente de Desenvolvimento Integrado RStudio (Rstudio Team, 2016), com o uso do pacote ‘ggplot2’ (Wickham, 2016). Para os diferentes usos e cobertura da terra calculados o coeficiente angular da regressão linear, utilizando os anos (tempo) como preditor e o EVI como variável resposta. Este procedimento possibilitou a comparação entre os diferentes tipos de uso e cobertura da terra no município de Tomé-Açu, assim como calculamos o desvio padrão e a tendência linear dos valores de EVI para cada unidade amostral anos avaliados (2000-2020). Para a análise de AGB, realizou-se comparação entre os dados por unidade amostral de FOR e SAF, para verificar o comportamento e a existência de padrão na distribuição dessa variável ao longo do tempo, considerou-se os anos de 2010 e de 2017 a 2020.

2.3 Resultados

Analisou-se 3.646 áreas de SAFs e 1.657 áreas de FOR. Na Figura 4, são apresentados os valores médios de EVI, desvio padrão e a tendência linear para FOR e SAF ao longo de duas décadas de amostragem. Observou-se que os perfis médios de EVI variaram entre 0,3 e 0,6, para ambos os tipos de uso e cobertura da terra, com média de EVI de 0,54 e desvio padrão de 0,03 para áreas de FOR e EVI médio de 0,58 com desvio padrão de 0,05 para áreas de SAF. A tendência da vegetação de FOR e SAF, através de algoritmo automatizado de análise linear dos dados, foi obtida pelo comportamento da reta, onde: $a > 0$ significa tendência positiva; e $a < 0$ indica tendência negativa, valores abaixo e acima de 0. Observou-se valores médios de 0,002 para FOR e 0,001 para SAF, indicando uma tendência de aumento sutil do EVI ao longo da série temporal avaliada.

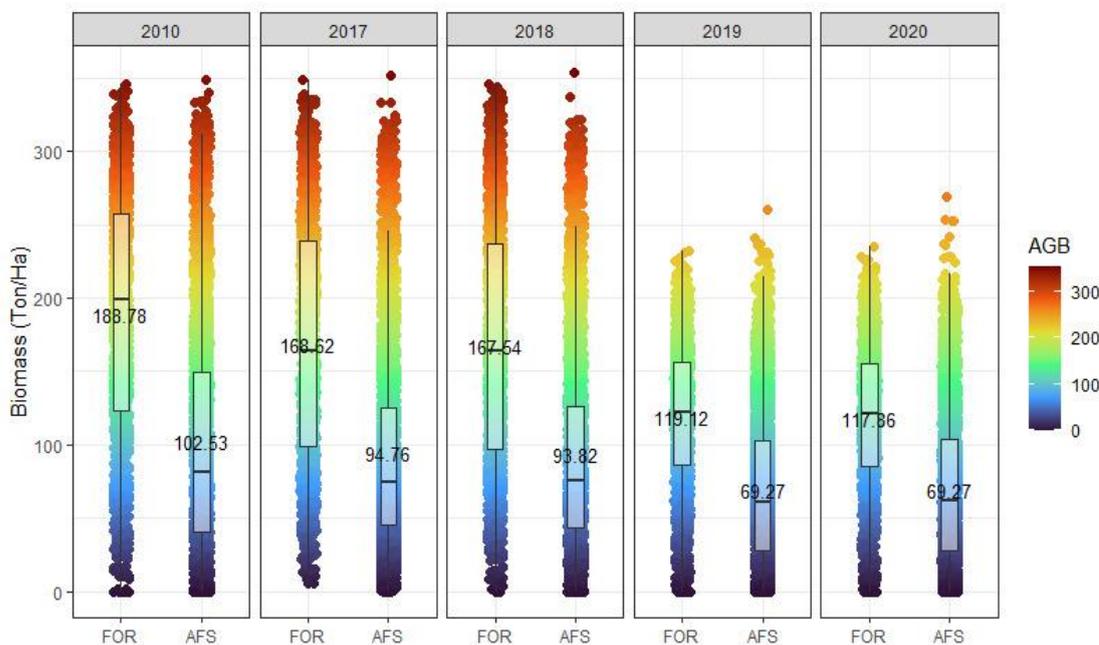
Figura 4 - Comportamento e médias de EVI, desvio padrão e tendência linear para Florestas (FOR) e Sistemas Agroflorestais (AFS).



Fonte:Elaborado pela autora.

A biomassa acima do solo (Figura 5) apresentou medianas maiores para as áreas de FOR em comparação às áreas de SAF em todos os períodos avaliados, apresentando valores mais elevados no início do período de análise, com valores no ano de 2010 para FOR e SAF em 188,78 ton.ha⁻¹ e 102,53 ton.ha⁻¹, respectivamente, e valores mais baixos ao final do período de análise sendo, respectivamente, 117,86 ton.ha⁻¹ e 69,27 ton.ha⁻¹ para FOR e SAF no ano de 2020, demonstrando que ao longo de todo o período houve perdas significativas de biomassa equivalentes a 62% e 67,5% para FOR e SAF ao longo dos anos amostrados. É interessante ressaltar que valores médios de biomassa para SAF se mantiveram estáveis nos anos 2019-2020, enquanto a FOR continuou perdendo biomassa.

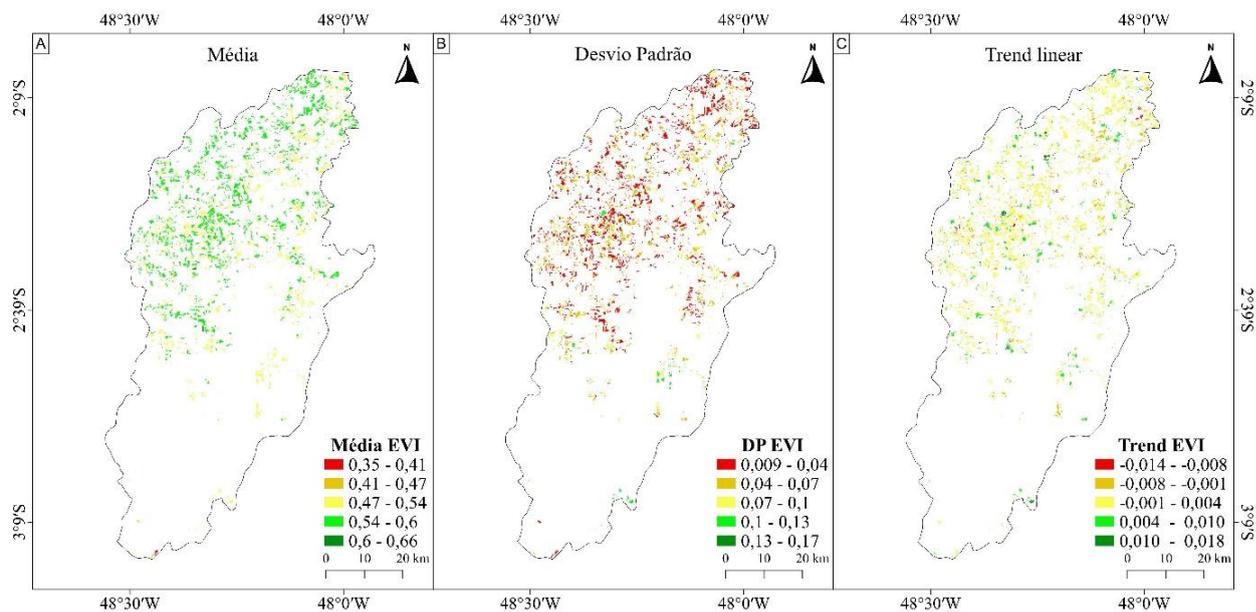
Figura 5 - Comportamento da biomassa acima do solo ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) para florestas primárias e sistemas agroflorestais nos anos de 2010 e 2017 a 2020.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por conseguinte, através dos mapas gerados para média de EVI, desvio padrão e tendência linear (Figura 6), é possível observar a dinâmica dos SAFs em Tomé-açu, demonstrando que as áreas de SAFs apresentaram valores médios (Figura 6a) de EVI entre 0,54 e 0,66 (classes 4 e 5), de modo que as maiores taxas de esverdeamento (entre 0,6 e 0,66) se concentraram, principalmente, na parte norte e noroeste do município de Tomé-Açu. Para o desvio padrão (Figura 6b) os índices variaram entre 0,09 e 0,04 (classe 1). A tendência linear (Figura 6c) variou de -0,008 a 0,004 (classes 2 e 3).

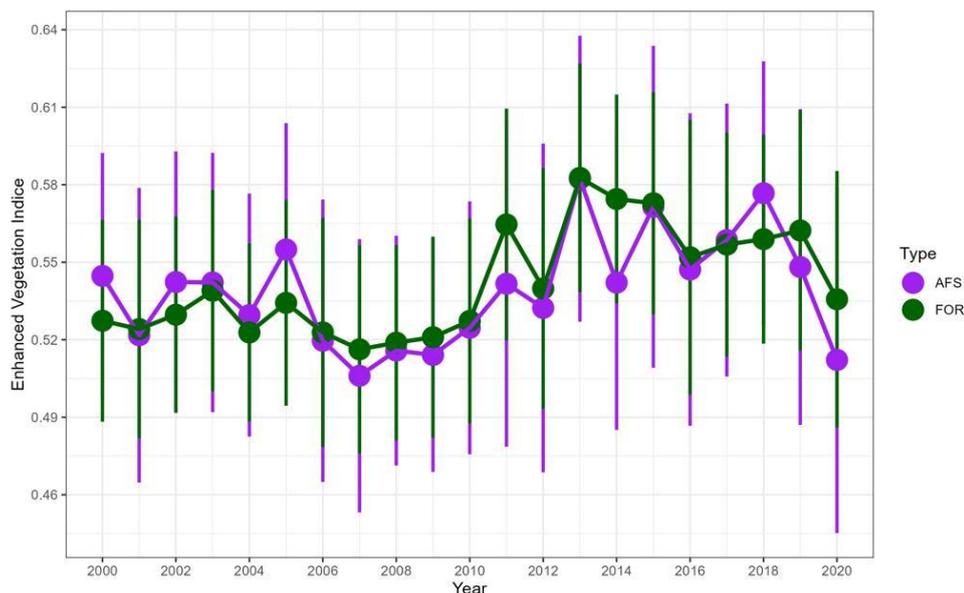
Figura 6 -Mapeamento das variáveis de: (a) médias de EVI; (b) desvio padrão e; (c) tendência linear para SAFs



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 7, observou-se que na série temporal de 2000 a 2020, os dois sistemas apresentaram comportamentos similares em quase toda a série avaliada, com exceção dos anos 2005, 2011, 2014, 2018 e 2020, de maneira atrativa para as FORs nos anos de 2011 e 2013 com maiores médias de EVI e menores em 2004 e 2007, e para os SAFs nos anos de 2005 e 2018 com maiores valores médios.

Figura 7 - Análise Gráfica da média de EVI em serie temporal de 21 anos (2000-2020) para Florestas e SAF de Tomé-Açu.



Fonte: Elaborado pela autora.

2.4 Discussão

2.4.1 Comportamento do EVI ao longo do tempo

De maneira geral, o comportamento médio do EVI para as classes avaliadas está dentro da faixa de vegetação estruturalmente saudável (Liu, Huete, 1997). Embora seja pequena a diferença encontrada entre os valores médios de EVI para FOR e SAF, os SAFs se destacaram por apresentarem valores superiores àqueles apresentados pelas FOR. Esse resultado pode estar relacionado a estratificação destes sistemas se assemelharem com as características da vegetação nativa (Young, 2017). Os resultados desta pesquisa foram superiores aos encontrados por Rua *et al.* (2023), que analisaram o comportamento da cobertura vegetal da microrregião de Tomé-Açu, encontrando EVI médio na faixa de $0,486 \pm 0,038$.

Trancoso *et al.* (2013) verificaram que valores mais altos de EVI, quando comparadas a áreas com fitofisionomias similares, podem ser indicadores de estado de conservação da vegetação ou indicar bom manejo da área. Além disso, esses dados servem como indicadores do crescimento e do vigor de vegetação verde e podem ser utilizados no diagnóstico de vários parâmetros biofísicos, como a biomassa aérea (Rizzi; Rudorff, 2007). Conforme Deheuvels *et al.* (2012), a estrutura do agroecossistema afeta a produtividade por meio da distribuição espacial mais do que pela composição botânica. E quanto mais complexa a estrutura, maior a

resiliência (Chen *et al.*, 2021). Podemos inferir assim que os resultados demonstram que os agroecossistemas apresentam estabilidade ecológica e podem ser associados com sistemas com um alto nível de resiliência ecológica pelo funcionamento e potencial produtivo apresentados em função de valores de EVI (Wang *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2015).

2.4.2 Análise de Biomassa acima do solo

De maneira geral, as florestas estocam mais carbono em sua biomassa do que os SAFs. Os resultados dessa pesquisa demonstram uma tendência de redução de biomassa acima do solo no decorrer dos anos para os ecossistemas avaliados. Apesar das médias de biomassa para SAF estarem reduzindo ao longo do tempo, estão dentro do limite encontrado em pesquisa de Yamada (2009). Este autor ao avaliar ecossistema agroflorestal de Tomé-Açu, constatou que a biomassa de alguns plantios consorciados, de 25 anos de idade, atingiu entre metade e dois terços da biomassa de florestas primárias. Bolfe *et al.* (2012), encontrou valores de biomassa em SAF de Tomé-Açu em torno de 89,10 Mg.ha⁻¹.

Os resultados demonstram que enquanto as áreas de FOR tendem a somente perder AGB ao longo do tempo avaliado (2010-2020). Os SAFs apresentaram indícios de comportamento estável nos anos 2019 e 2020, podemos assim esperar que nos SAFs os valores de biomassa possam se manter ou até mesmo variar positivamente em função do tempo, considerando a diversidade das espécies, o manejo e da idade, uma vez que, os SAFs mais jovens, onde as atividades fisiológicas são mais intensas, apresentam maior incremento em biomassa, devido a influência positiva desses fatores sobre esta variável (Santos; Kato; Tourinho, 2018).

De acordo com Smith e Wollenberg (2012), os SAFs acumulam de 3 a 4 vezes mais biomassa do que os sistemas tradicionais de cultivo sem árvores. E a variedade de abordagens de manejo nesses sistemas o tornam potenciais em implicações positivas para a mitigação das mudanças climáticas (Albrecht; Kandji, 2003).

Dessa forma, os resultados demonstram que os sistemas agroflorestais são uma estratégia importante para aumentar o sequestro de C da biomassa. Corroborando com resultados encontrados por Cardozo *et al.* (2022), que avaliou estoque de carbono acima do solo em SAFs, na região de Tomé-Açu, demonstrando que a diversidade e a complexidade da estrutura da vegetação estão associadas a maiores estoques de carbono.

Por outro lado, as florestas estarem sofrendo perda de biomassa no decorrer do tempo é preocupante, uma vez que, desempenham um papel importante no balanço de carbono de longo

prazo (Houghton, 2005). Esse resultado permite *insights* relacionados ao histórico de distúrbios, produtividade regional e gerenciamento de recursos naturais do município, que poderá se acentuar em um cenário com mudanças climáticas tanto para FOR quanto para SAFs.

2.4.3 Análise Espacial dos SAFs

O padrão apresentado pelos SAFs na análise espacial pode estar relacionado a imigração dos japoneses para o município de Tomé-Açu e criação Cooperativa Mista de Tomé-Açu no distrito de Quatro Bocas, que a partir do ano 2000 implantou inúmeros SAFs, com mais de 200 arranjos experimentais com espécies frutíferas, agrícolas e madeireiras (HOMMA, 2004; Bolfe *et al.* 2010). Os resultados positivos alcançados pela CAMTA, incentivou agricultores familiares das comunidades próximas a também adotarem a tecnologia agrícola social absorvendo o modo de produção em SAFs, como é o caso dos agricultores de Santa Luzia. Com a finalidade de eliminar perdas de produção, agregar valor, eliminar atravessadores e elevar a rentabilidade, esses agricultores fundaram em 2005 a Associação de Produtores e Produtoras de Agricultura Familiar do Município de Tomé-Açu - APPRAFAMTA (Falesi, 2009; Couto, 2013). Isso explica o crescente número de áreas de SAFs seguirem este padrão de distribuição, concentrados mais ao norte e noroeste do município. Além disso, os sistemas agroflorestais apresentam dinâmica fotossintética diferenciada devido ao arranjo das espécies, e condições edafoclimáticas do local, possibilitando assim valores de EVI maiores, por estarem em constante evolução e que com o tempo tendem a ficar cada vez mais estáveis e apresentar melhores condições (Santos, 2022).

Embora os resultados para estas áreas se apresentem com menores médias de desvio padrão, entre 0,009 e 0,04 (Fig. B) e valores médios negativos de tendencia, entre -0,001 e 0,004 (Fig. C), pode-se relacionar esse resultado ao fato dos sistemas agroflorestais, gradativamente, terem ocupado espaços antes utilizados pela agricultura tradicional de corte e queima, sobretudo no período de 1994 a 2013 (Costa *et al.*, 2017).

2.4.4 Análise espaço-temporal

O comportamento oscilatório nas médias de EVI no decorrer do tempo observado para as áreas de SAF era esperado, pois todas as etapas que sucedem a instalação de um SAF resultam em variações de cobertura e vegetação devido aos manejos de poda, ciclos das culturas e suas colheitas. De acordo com Bolfe (2010), cada sistema agroflorestal implantado possui uma dinâmica fotossintética diferenciada, devido às condições edafoclimáticas intrínsecas do

ambiente e pelo arranjo de espécies anuais, semi-perenes e perenes utilizadas na composição das áreas de cultivo, o que conseqüentemente interfere na resposta espectral. Assim como a composição florística, idade do sistema, influência do manejo, condições ambientais e complexidade estrutural (Zhang; Chen 2015; Ali *et al.*, 2016; Kuyah *et al.*, 2014). No entanto, mesmo com tantas variações, os SAFs conseguem alcançar padrões próximos aos de ecossistemas naturais.

Embora o comportamento médio do EVI apresentados pela FOR tenha sido menor, seus valores de desvio padrão também mais baixos indicam maior estabilidade e uniformidade no comportamento dessas áreas. Enquanto a oscilação nas áreas de SAF é comprovada pelos valores de desvio padrão mais elevados, que indicam maior flutuação no crescimento e na saúde da vegetação nessas áreas (Borges; Sano, 2014).

Esse padrão de variação também fica evidente ao observar as médias dos valores de EVI nos dois tipos de uso e cobertura ao longo dos anos, mostrando que as áreas de SAF tiveram mais variações, enquanto as áreas de floresta permaneceram mais estáveis, apresentando variações mais distintas nos anos de 2010, 2015 e 2018, o que pode ser explicado pela ocorrência do fenômeno El Niño nos anos em questão, que ao influenciar o regime de precipitação na região Amazônica também afeta o comportamento natural da vegetação (Andreoli *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2022).

Dessa forma, por mais que a variabilidade seja levemente maior nas áreas de SAF, o comportamento de ambos os tipos de cobertura apresenta tendências lineares de EVI com valores > 0 , indicando estabilidade e melhorias na saúde da vegetação ao longo do período analisado.

2.5 Conclusão

O uso do sensoriamento remoto e dados oriundos das bases de dados selecionadas criteriosamente, permitiram inferir sobre a estrutura do dossel e fenologia foliar dos SAFs, por meio do EVI, e a utilização de trabalhos realizados em campo, possibilitaram a comparação das variáveis deste estudo, assim como verificar a compatibilidade e localização das áreas de SAF no município de Tomé-Açu. Dessa forma, os resultados alcançados nesta pesquisa alcançaram respostas positivas aos questionamentos propostos, de maneira que os SAFs da região de Tomé-Açu conseguem ser similares do ponto de vista estrutural das florestas maduras, de tal maneira

que apresentaram padrão semelhante de comportamento de EVI ao longo de 20 anos, demonstrando baixa oscilação na estabilidade também semelhante as florestas.

A biomassa acima do solo, apesar de decrescer ao longo do tempo, apresentou certa estabilidade nos últimos anos, sendo necessários mais estudos que complementem e expliquem este efeito. Destaca-se assim que os sistemas agroflorestais representam uma oportunidade para a mitigação sobre o efeito das mudanças climáticas. Acredita-se que os resultados possam contribuir como estágio inicial de estudo para o estabelecimento de práticas de conservação e incentivo de políticas públicas para região do bioma da Amazônia. Destacando a necessidade de trabalhos com metodologia mais robusta, que sejam delimitadas as áreas de classificação supervisionada, podendo assim descartar o máximo de erros e interferências de cruzamento de dados.

De maneira geral, os resultados deste estudo indicam que os sensores remotos podem ser uma ferramenta valiosa para o estudo da estrutura e da fenologia dos SAFs. No entanto, é importante ressaltar que os resultados devem ser interpretados com cautela, devido às limitações da metodologia. O emprego dos sensores remotos como fonte primária de análise foi um ponto forte do estudo, pois permitiu a obtenção de dados de grande escala e cobertura espacial, que seriam inviáveis de serem coletados apenas por métodos de amostragem de campo. Os sensores remotos permitiram ao estudo inferir sobre a estrutura e a fenologia dos SAFs na região de Tomé-Açu, Pará, com uma precisão razoável. No entanto, é importante ressaltar que os sensores remotos têm suas limitações. Por exemplo, eles podem não ser capazes de detectar todas as espécies de plantas e animais que compõem os SAFs. Além disso, eles podem ser afetados por fatores ambientais, como a cobertura de nuvens e a vegetação circundante.

Portanto, estudos futuros que utilizem métodos de amostragem de campo em conjunto com sensores remotos podem contribuir para melhorar a precisão das estimativas obtidas por essa abordagem. Estudos futuros para a região avaliada são necessários para complementar os resultados do estudo atual. Essas pesquisas poderiam incluir estimativas da biomassa abaixo do solo, avaliação da biodiversidade e estudos sobre os efeitos dos SAFs no clima e no meio ambiente. Essas pesquisas são importantes para entender o papel dos SAFs na conservação da biodiversidade e no combate às mudanças climáticas.

Referências

- ALBRECHT, A.; KANDJI, ST. Sequestro de carbono em sistemas agroflorestais tropicais. **Agric Ecosyst Environ**, v. 99, p. 15 – 27, 2003
- ALI, A. *et al.* A diversidade estrutural em vez da diversidade de espécies aumenta o armazenamento de carbono acima do solo em florestas subtropicais secundárias no leste da China. **Biogeosciences**, v. 13, p. 4627-4635, 2016
- ALVARES, C. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift.**, v. 22. 10.1127/0941-2948/2013/0507, 2013.
- ANDREOLI, R. *et al.* The influence of different El Niño types on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 1374-1390, 2017.
- ASSAD, E. D. *et al.* **Role of abc plan and planaveg in the adaptation of brazilian agriculture to climate change.** Working Paper. São Paulo, Brasil: WRI Brasil. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/publicações> Acesso em: 18 out. de 2022
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Banco de dados de informações ambientais - BDIA.** 2021. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/vegetacao>. Acesso em: 22 de Março de 2022.
- BARROS, A. V. L., HOMMA, A. K. O., KATO, O. R., MENDES, F. A. T., VERDE, M. F. A. **Evolução dos sistemas agroflorestais desenvolvidos pelos agricultores nipo-brasileiros do município de Tomé-Açu.** Evolução e percepção dos sistemas agroflorestais desenvolvidos pelos agricultores nipo-brasileiros do município de Tomé-Açu, estado do Pará. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 5, n. 9, p. 121-151, 2009.
- BENYUS, J.M. **Biomimética: inovação inspirada na natureza.** Nova York: HarperCollin, 1997.
- BIUDES M. S. *et al* 'Evapotranspiration Seasonality over Tropical Ecosystems in Mato Grosso, Brazil'. **Sensoriamento Remoto**, v. 14, p. 1-25, 2022.
- BOLFE, E. L, BATISTELLA, M. Análise florística e estrutural de sistemas silviagrícolas em Tomé-Açu, Pará. **Pesq. Agropec**, v. 46, p. 1139-1147, 2011.
- BOLFE, E. L.; FERREIRA, M. C.; BASTISTELLA, M. Biomassa epígea e estoque de carbono de agroflorestas em Tomé-Açu, PA. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, p. 2171-2175, 2010.
- BOLFE, M. *et al.* Correlação de variáveis espectrais e estoque de carbono da biomassa aérea de sistemas agroflorestais. **Pesq.agropec. Bras.** v. 47, p. 1261-1269, 2012.
- BORGES, E. F, SANO, E. E. Séries temporais de EVI do MODIS para o mapeamento de uso e cobertura vegetal do oeste da Bahia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, p. 526-547, 2014.
- BRASIL. Leis, Decretos, etc. **Decreto nº 7.830, de 17 de outubro de 2012.** Dispõe sobre o

Sistema de Cadastro Ambiental Rural, o Cadastro Ambiental Rural, estabelece normas de caráter geral aos Programas de Regularização Ambiental, de que trata a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/decreto/d7830.htm Acesso em: 30 mar. 2023.

BRAZ, A.M.; ÁGUAS, T.A.; GARCIA, P.H.M. Análise de índices de vegetação NDVI e SAVI e Índice de Área Foliar (IAF) para a comparação da cobertura vegetal na bacia hidrográfica do córrego Ribeirãozinho, município de Selvíria– MS. **Revista Percurso**, v. 7, p. 5-22, 2015.

CARDOZO, E.G *et al.* Sistemas agroflorestais recuperam o estoque de carbono das árvores mais rapidamente do que a sucessão natural na Amazônia Oriental, Brasil. **Agroforest Syst**, v. 96, p. 941–956, 2022.

CHEN, L. T, JIANG, L.; JING X. A biodiversidade acima e abaixo do solo impulsiona conjuntamente a estabilidade do ecossistema em pastagens alpinas naturais no planalto tibetano. **Glob. Eco. Biogeogr**, v. 30, p. 1418–1429, 2021.

CHISHOLM, R. A. *et al.* Relações dependentes de escala entre a riqueza de espécies de árvores e a função do ecossistema nas florestas. **Journal of Ecology**, v. 101, p. 1214-1224, 2013.

CHU, H.; VENEVSKY, S.; WU, C. Dinâmica de vegetação baseada em NDVI e sua resposta às mudanças climáticas na bacia do rio Amur-Heilongjiang de 1982 a 2015. **Sci Ambiente**, v. 650, p. 2051-2062, 2019.

COUTO, M.C.M.; KATO, O.R.; SANTANA, A.C. A evolução agrícola na comunidade Santa Luzia, município de Tomé-açu-PA: do monocultivo à diversificação da produção em Sistemas Agroflorestais. **Cadernos de Agroecologia**, v. 8, p. 1-5, 2013.

DEHEUVELS, O. Estrutura da vegetação e produtividade em sistemas agroflorestais à base de cacau em Talamanca, Costa Rica. **Agricultura, Ecossistemas e Meio Ambiente**, v. 149, p. 181–188, 2012.

EARTH ENGINE. **Google Earth Engine. FAQ.** Disponível em: <https://earthengine.google.com/faq/>>. Acesso em: 10 jan. 2023.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Brasília,DF: Embrapa Produção de Informação, 1999.

EUROPEAN SPACE AGENCY-ESA. **Biomass Instruments**. 2023. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/biomass>. Acesso em: 10 abr. 2023.

FALESI, L.A **A dinâmica do mercado de frutas tropicais no estado do Pará: uma abordagem econométrica**. 2009. 139f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal Rural da Amazônia e Embrapa – Amazônia Oriental, Pará, 2009.

FORMIGONI, M.H.; XAVIER, A.C.; LIMA, J.S Análise temporal da vegetação na região do Nordeste através de dados EVI do MODIS. **Ciênc. Florest**, v. 21, p. 1-8, 2011.

GARRITY, D.P. Agrofloresta Baseada na Ciência e os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio. In: GARRITY, D.P. *et al* (ed). **World agroforestry into the future**. Nairobi: World Agroforestry Centre, ICRAF, 2006. p 3-8.

GORELICK N. *et al*. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.

HANSEN, M.C. *et al*. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. **Science**, v. 342, p. 850-853, 2013.

HOMMA, A.K.O. Dinâmica dos sistemas agroflorestais: o caso da Colônia Agrícola de Tomé-Açu, Pará. **Revista do IESAM. Revista Instituto de Estudos Superiores da Amazônia**, Belém, v. 2, p. 57-65, 2004.

HOUGHTON, R.A. Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. **Global Change Biology**, v. 11, p. 945–958, 2005.

HOUGHTON, R.A. *et al*. Carbon emissions from land use and land-cover change. **Biogeosciences**, v. 9, p. 5125-5142, 2012.

HUETE, A. *et al*. ‘Comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS’, **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440-451, 1997.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

HUETE, A.R A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Tomé-Açu: panorama**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/tome-acu/panorama>. Acesso em: 4 fev. 2023.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL E AMBIENTAL DO PARÁ-IDESP. **Estatística Municipal: Tomé-Açu**. Belém, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE. Centro Regional da Amazônia (INPE/CRA). **Dados TerraClass**. Disponível em: http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2014.php. Acesso em: 5 fev. 2023

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. “**Summary for policymakers” in climate change 2023**: Synthesis Report. A report of the intergovernmental panel on climate change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by H. Lee and J. Romero, 1–36. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.

KALAMANDEEN, M. *et al*. Pervasive rise of small-scale deforestation in Amazonia. **Scientific Reports**, v. 8, p. 1-10, 2018.

KIM, J.Y.; RASTOGI, G.; DO, Y. Tendências em um Índice de Vegetação Derivado de Satélite e Variáveis Ambientais em uma Lagoa Salobra **Restaurada**. **Glob. Eco. Conserva**, v. 4, p. 614–624, 2015.

KUYAH, S.; SILESHI, W.G.; NJOLOMA, J. Estimativa da biomassa arbórea acima do solo em três diferentes florestas de miombo e sistemas de uso da terra associados no Malawi. **Bioeno de Biomassa**, v. 66, p. 214-222, 2014.

LORENZ, K.; LAL, R. **Sequestro de Carbono em Ecossistemas Florestais**. Springer, 2014.

LU, D.S.; BATISTELLA, M.; MORAN, E. Satellite estimation of aboveground biomass and impacts of forest stand structure. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 71, p. 967-974, 2005.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomass** – Coleção 2022 da Série Anual de Mapas de Cobertura e uso de Solo do Brasil 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/visao-geral-da-metodologia>. Acesso em: 10 abr. 2023

MARAIS, Z.E. *et al.* Shelterbelt species composition and age determine structure: Consequences for ecosystem services, **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 329: 107884, 2022.

MARTINS, A. *et al.* Variação temporal do índice de inclinação por diferença normalizada (NDVI) no Parque Natural Municipal do Pedroso, Santo André-SP. *In*: LADWIG, N.I.; CAMPOS, J.B (eds). **Planejamento e gestão territorial: áreas protegidas**. Criciúma, SC, 2021. p. 91-103.

MEYBECK, A. *et al.* **Abordando a silvicultura e a agrofloresta nos Planos Nacionais de Adaptação** – orientações complementares. Bogo/Roma: FAO e FTA, 2020.

MICHALETZ, S.T.; CHENG, D.; KERKHOFF, A. Convergência da produção de plantas terrestres em gradientes climáticos globais. **Natureza**, v. 512, p. 39 – 43, 2014.

MIRANDA, O.S.; RODRIGUES, W. **Sistema agroflorestal: agricultura em andares**. Belém, NUMA-UFPA, 1999.

NAIR, P.K.R. The coming age of agroforestry. **J. Sci. Food Agric**. v. 87, p. 1613–1619, 2007.

NEPSTAD, D *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. **Science**, v. 344, p. 1118–1123, 2014.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto princípios e aplicações**. 2.ed. São Paulo:[s.n], 1998.

PAN, N.; FENG, X.; FU, B.J. Aumento do escurecimento global da vegetação oculto no esverdeamento geral da vegetação: insights de tendências variáveis no tempo. **Sensoriamento remoto do ambiente**, v. 214, p. 59-72, 2018.

PAN, Y. *et al.* The Structure, distribution, and biomass of the world's forests. **Annual Review**

of **Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 44, p. 593-622, 2013.

PATIL, P.; KUMAR, A.K. Biological carbon sequestration through fruit crops (perennial crops-natural "sponges" for absorbing carbon dioxide from atmosphere). **Plant Archives**. v. 17, p. 1041-1046, 2017.

POMPEU, G.S.S **Sistemas agroflorestais: manejo, sustentabilidade e percepção ambiental dos agricultores de Tomé – Açu, Pará, Brasil**. 2017. 160f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Pará.

QUADROS, J. S. *et al.* Mapeamento e quantificação de sistemas agroflorestais (SAFs) como alternativa de recuperação de áreas degradadas no Município de Tomé-Açu/PA. *In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 70^a ., 2018, Maceió. Anais[...].* Maceió /AL: UFAL, 2018.

QUANDT A, NEUFELDT, H.; GORMAN, K. Climate change adaptation through agroforestry: opportunities and gaps. **Current Opinion in Environmental Sustainability**. v. 60, p. 1-7, 2023.

QUANDT, A.; NEUFELDT, H.; MCCABE, J.T. Building livelihood resilience: what role does agroforestry 30 play? **Clim. Dev**, v. 11, p. 485-500, 2019.

RANGEL, E. Rocha *et al.* Biomimética: innovación sustentable inspirada por la naturaleza. **Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes**. v. 55, p. 56-61, 2012.

REIS, G.M. **Caracterização de diferentes sistemas agroflorestais com dendê no município de Tomé-Açu, Pará**. 2019. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Tomé Açu, Pará, 2019.

RÉJOU-MÉCHAIN, M. *et al.* Biomass: an R package for estimating above-ground biomass and its uncertainty in tropical forests. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 8, p. 1163–1167, 2017.

REY BENAYAS, J.M.; BULLOCK, J.M. Restoration of biodiversity and ecosystem services on agricultural land. **Ecosystems**, v. 15, p. 883-899, 2012.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônômico para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 73-80, 2007.

RSTUDIO INC. **RStudio: integrated development environment for r (version 1.0.44)**. Boston, MA. Disponível em: <https://www.rstudio.com/> Acesso em: 10 de abr. 2023

RUA, M.; SIQUEIRA, G.; SANTOS, A. Meteorological Influence on Space-time Distribution of Tomé-Açu (Eastern Amazon) Vegetation Cover using MODIS Products. **Anuário do Instituto de Geociências**. v. 46, p. 1-11, 2023.

SAATCHI, S.S. *et al.* Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proc Natl Acad Sci U S A**, 108: 9899-904, 2011.

SANTORO, M.; CARTUS, O. **ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global Datasets of Forest Above-Ground Biomass for the Years 2010, 2017 and 2018, v2.** Centre for Environmental Data Analysis (CEDA), Oxfordshire, 2021.

SANTOS, G.A. **Avaliação de implantação de um sistema agroflorestal e seus impactos na vegetação.** 2022. 23f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) - Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Minas Gerais, 2022.

SANTOS, J.C.; ALVES MOYSÉS, C. Desempenho Econômico-Financeiro De Sistema Agroflorestal Na Região De Tomé-Açu, Pará. **Agrotópica**, v.32, p. 197 – 206, 2020.

SANTOS, S.R.dos; KATO, O.; TOURINHO, M. Diversidade florística e estoque de carbono de sistemas agroflorestais em dois municípios do nordeste paraense, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – Ciências Naturais**, v. 14, p. 31-42, 2018.

SCHROTH, G. *et al.* **Agrossilvicultura e conservação da biodiversidade em paisagens tropicais: uma síntese.** Washington, DC: Island Press, 2004.

SETIAWAN, Y.; KUNIHICO, Y.; “Change detection in land-use and land-cover dynamics at a regional scale from modis time-SERIES IMAGERY.” **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 7, p. 243-248, 2012.

SETIAWAN, Y.; YOSHINO, K. Detecting land-use change from seasonal vegetation dynamics on regional scale with MODIS EVI 250-m time-series imagery. **Journal of Land Use Science**. v. 9, p. 1-27, 2013.

SHI, H. *et al.* Assessing the ability of MODIS EVI to estimate terrestrial ecosystem gross primary production of multiple land cover types. **Ecological Indicators**, v. 21, n. 72, p. 153-164, 2017.

SILVA, L. F *et al.* Mapeamento das classes do cadastro ambiental rural (CAR) De imóveis rurais familiares e não familiares nas chapadas e grotas do alto Jequitinhonha-MG. **Holos Environment**, v. 21, p. 160-172, 2021.

SMITH, P. *et al.* Impacts on terrestrial biodiversity of moving from a 2 C to a 1.5 C target. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. v. 356: 1-18, 2018.

SMITH, P. *et al.* Interlinkages between desertification, land degradation, food security and greenhouse gas fluxes: Synergies, trade-offs and integrated response Options. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/09_Chapter-6.pdf Acesso em: 6 jan. 2023

SMITH, P.; WOLLENBERG, E. **Alcançar a mitigação por meio de sinergias com a adaptação.** **Climate Change Mitigation and Agriculture.** ICRAF -CIAT, London -New York, 2012. p. 50-57.

SOMARRIBA E, B. J. Productivity of Theobroma cacao agroforestry systems with timber or legume service shade trees. **Agroforest Syst**, v. 81, p. 109-121, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9364-1>.

SOUSA, L.M *et al.* Análise multitemporal do desmatamento no município de Tomé-Açu entre 1985 a 2018. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, p. 1-11, 2022.

SOUSA, L.M; ADAMI, M.; LIMA, A.M.M. Avaliação Do Uso E Cobertura da Terra em Paragominas e Ulianópolis-PA, Utilizando dados do Projeto TerraClass. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, p. 421-431, 2017.

SOUZA, S.A.S.de. *et al.* Variabilidade da precipitação na Mesorregião Sul do Amazonas em decorrência de eventos de El Niño. **RA'E GA-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 54, p. 23-36, 2022.

TRANCOSO, R. 'Análise comparativa de índices de vegetação por categoria territorial nos estados do Pará e do Mato Grosso'. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 16, p. 3344-3351, 2013.

WANG, J.; XIE, Y.; WANG, X. Detecting Patterns of Vegetation Gradual Changes (2001–2017) in Shiyang River Basin, Based on a Novel Framework. **Remote Sensing**. v. 11, p. 1-24, 2019.

WICKHAM, H. **ggplot2**: gráficos elegantes para análise de dados. Nova York: Springer-Verlag, 2016.

WINKLER K *et al.* Global land use changes are four times greater than previously estimated. **Nat Commun**, v. 12, p. 1-12, 2021.

YAMADA, M. Uma breve história de desenvolvimento agroflorestal Nikkei na Amazônia: O caso da colônia de Tomé-Açu. In: PORRO, R. (ed.). **Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação**. Brasília, DF: Embrapa, 2009. p.691- 704.

YOUNG, K. J. Mimicking nature: a review of successional agroforestry systems as an analogue to natural regeneration of secondary forest stands. In: Montagnini, F. (ed). Integrating landscapes: agroforestry for biodiversity conservation and food sovereignty. **Advances in Agroforestry**, v. 12, p. 179-209, 2017.

ZHANG, M *et al.* Spatio-Temporal Variation and Impact Factors for Vegetation Carbon Sequestration and Oxygen Production Based on Rocky Desertification Control in the Karst Region of Southwest China. **Remote Sensing**, v. 8, p. 1-18, 2016.

ZHANG, Y.; CHEN, H.Y.H. Individual size inequality links forest diversity and above-ground biomass. **J Ecol**, v. 103, p. 1245-1252, 2015.

ZHANG, Y.; CHEN, H.Y.H.; REICH, P.B. Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. **Journal of Ecology**, v. 100, p. 742–749, 2012.

ZOMER, R.J. *et al.* Global Tree Cover and biomass carbon on agricultural land: the contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1-12, 2016.

CAPÍTULO 3 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE OS SISTEMAS AGROFLORESTAIS NA AMAZÔNIA

Resumo

Sistemas Agroflorestais (SAFs) podem apresentar alta resiliência frente às mudanças climáticas, em função do seu potencial na captura de carbono, tanto pelo solo quanto devido a sua estrutura arbórea perene acima do solo. No entanto, existem poucas informações disponíveis que permitam avaliar a contribuição e potencialidade dos SAFs. Ainda não existem estudos sobre a exposição e o risco climático ao qual estes sistemas estarão expostos em breve. Dessa forma, esta pesquisa objetiva realizar a primeira avaliação do risco climático sobre os SAFs da região amazônica, através de estudo no município de Tomé-Açu, considerando variáveis bioclimáticas, como Temperatura Média Anual (BIO1), Precipitação Acumulada (BIO12) e Sazonalidade da Precipitação (BIO15), em dois cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, nos períodos de 2021-2040 a 2081-2100, adotando a abordagem de “espaço operacional climaticamente seguro”. Os resultados demonstram que até o final do século haverá uma redução de 96 mm a 220 mm na BIO12, aumento de 1,5°C a 4°C na BIO1 e aumento de 4% a 8% na BIO15, nos agroecossistemas de Tomé-Açu, do SSP2-4.5 e 8.5, respectivamente, podendo resultar diretamente em redução na aptidão da produção da região como um todo. Observou-se também certa adaptação desses sistemas às novas condições climáticas, em especial, na região Leste do município. No entanto, são necessárias medidas sustentáveis que evitem cenários mais críticos de mudanças climáticas para a região amazônica.

Palavras-chave: Cenários climáticos; espaço climático de segurança; adaptação.

Abstract

Agroforestry systems (SAFs) can be highly resilient to climate change, due to their potential in carbon capture, both by the soil and due to their perennial above-ground tree structure. However, there is little information available to assess the contribution and potential of SAFs. There are still no studies on the exposure and climate risk to which these systems will soon be exposed. Thus, this research aims to conduct the first evaluation of climate risk on SAFs in the Amazon region, through a study in the municipality of Tomé-Açu, considering bioclimatic

variables such as Annual Average Temperature (BIO1), Accumulated Precipitation (BIO12) and Seasonality of Precipitation (BIO15), in two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5, for the periods 2021-2040 and 2081-2100, adopting the "safe operational climate space" approach. The results show that by the end of the century there will be a reduction of 96mm to 220mm in BIO12, an increase of 1.5°C to 4°C in BIO1 and an increase of 4% to 8% in BIO15, in the agroecosystems of Tomé-Açu, SSP2-4.5 and 8.5, respectively, which could directly result in a reduction in the production aptitude of the region as a whole. A certain adaptation of these systems to the new climatic conditions was also observed, especially in the eastern region of the municipality. However, sustainable measures are needed to avoid more critical scenarios of climate change for the Amazon region.

Key-words: Climate scenarios; climate security space; adaptation.

3.1 Introdução

Mudanças climáticas antropogênicas estão provocando mudanças abruptas nos ecossistemas em uma escala global (Ratajczak *et al.*, 2018). Verkamp *et al.* (2020) demonstram que as mudanças no clima continuarão a representar ameaças significativas à biodiversidade e a alguns serviços ecossistêmicos, como regulação do clima e ciclagem de nutrientes, que estão em risco crescente de declínio com consequências graves para o bem-estar da humanidade (Tittensor *et al.*, 2014).

O último relatório (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) afirma que o aquecimento global continuará a ser intenso em curto prazo (2021-2040), principalmente devido ao aumento cumulativo das emissões de Dióxido de Carbono (CO₂), sendo este um dos maiores desafios globais para a humanidade no século XXI. Steffen *et al.* (2015) afirmam que as ações humanas sobre o planeta já transgrediram os limites planetários da integridade da biosfera, dos fluxos biogeoquímicos, estando muito próximo de se ultrapassar o limite planetário da estabilidade climática.

Os efeitos significativos mais esperados com as mudanças climáticas são aumento da temperatura e na frequência de eventos climáticos extremos, além de alterações nos padrões de precipitação e circulação atmosférica, elevação do nível do mar, entre outros (IPCC, 2023). Tais efeitos podem afetar negativamente o meio, os ecossistemas naturais e agroecossistemas, a saúde, segurança alimentar e a economia, em níveis locais, regionais e globais (Bellard *et al.*,

2012; Lovejoy; John Heinz, 2008; Pecl *et al.*, 2017). Apesar de alguns impactos serem inevitáveis e/ou irreversíveis, estes podem ser limitados por uma redução profunda, rápida e sustentada das emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE) (IPCC, 2023).

Nessa perspectiva, surge a necessidade de garantir um espaço operacional climaticamente seguro (EOCS), definido como a capacidade adaptativa do planeta de criar um limite de fronteiras biofísicas locais e globais para o desenvolvimento da humanidade em um curto e longo prazo (Neufeldt *et al.*, 2013; Steffen *et al.*, 2018). Para definir os limites modernos para as variáveis de estado biofísico do sistema terrestre Rockström *et al.* (2009) consideraram o Holoceno (últimos 11.000 anos) como período de linha de base. Singh e Chudasama (2021) conceituaram como uma estrutura resiliente ao clima como um desenvolvimento que abrange mitigação, adaptação e desenvolvimento sustentável inclusivo para promover a saúde planetária e o bem-estar de todos.

Com o objetivo de preservar as condições climáticas do planeta dentro de um limite que garanta o desenvolvimento humano, temperaturas estáveis, disponibilidade de água doce e fluxos biogeoquímicos equilibrados (Rockström *et al.*, 2009), são adotadas medidas como a implementação de infraestruturas resilientes às mudanças climáticas e a gestão sustentável dessas alterações.

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs), apesar de também estarem sujeitos aos riscos climáticos, incluindo secas, inundações, tempestades e outras condições meteorológicas extremas, podem apresentar alta resiliência, garantir a segurança alimentar, a sustentabilidade ambiental, em função da captura de carbono no solo e em sua estrutura arbórea perene acima do solo, promover a conservação da biodiversidade e a redução das emissões de GEE associadas à produção agrícola (Zomer *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2018; Smith *et al.*, 2019; Cardozo *et al.*, 2022; IPCC, 2023).

Até o momento existem poucas informações disponíveis que nos permitam avaliar a contribuição e potencialidade dos SAFs nesse contexto (YASIN *et al.*, 2023). De acordo com estudo recente de Quandt *et al.* (2023), mais pesquisas são necessárias para entender as maneiras diferenciadas pelas quais os sistemas agroflorestais podem contribuir para a atenuação das alterações climáticas, assim como nos contextos socioeconômicos, biofísicos e geográficos. E ainda não há informações sobre a exposição e o risco climático ao qual estes sistemas estarão expostos em um futuro próximo.

Como meios para identificar, quantificar e analisar as possíveis trajetórias das

sociedades em relação à mudança climática, os cenários climáticos “*Shared Socioeconomic Pathways*” (SSPs) desempenham papel importante nesta pesquisa, pois permitem uma compreensão mais aprofundada da sensibilidade das estratégias climáticas às tendências socioeconômicas, desenvolvimento de cenários integrados, combinando projeções de modelos climáticos e condições socioeconômicas (Janetos, 2014). Além disso, são empregados para o desenvolvimento de cenários integrados de emissões, uso da terra e análises de impacto climático, adaptação e vulnerabilidade (O’Neill *et al.*, 2017).

O objetivo dessa pesquisa é avaliar a exposição dos sistemas agroflorestais do município de Tomé-Açu às mudanças climáticas futuras, considerando o aumento da Temperatura Média Anual (BIO1) e a variação na disponibilidade de água (BIO12 e BIO15), em uma abordagem de EOCS.

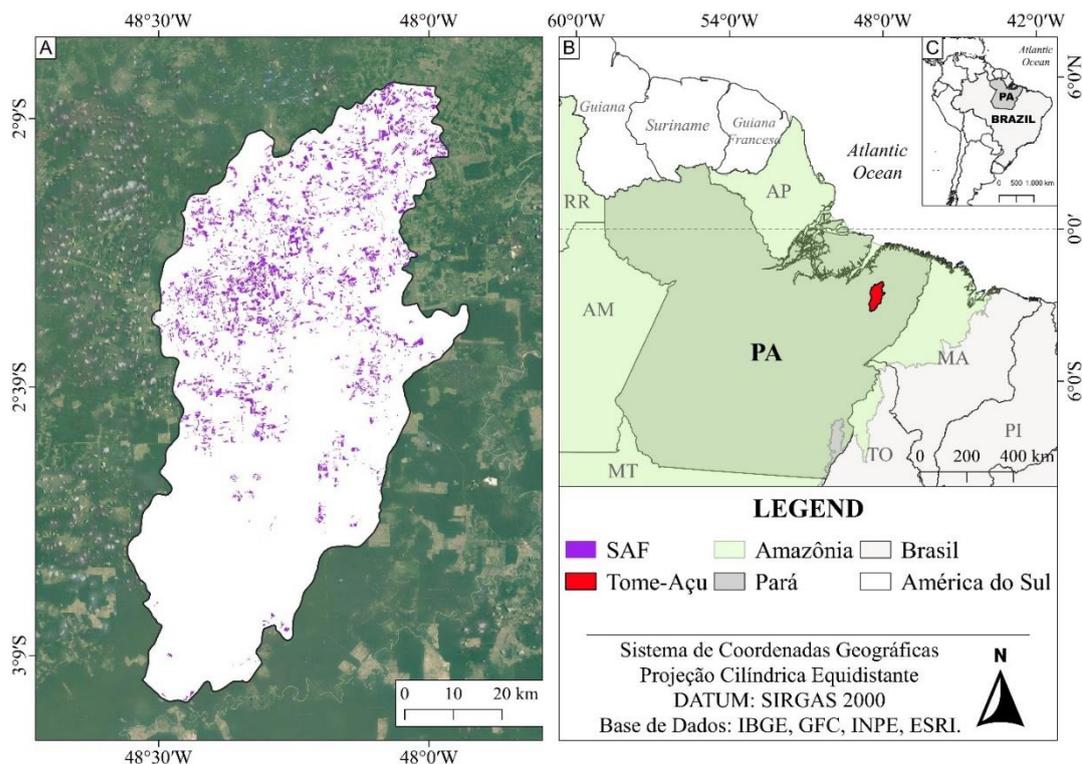
3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

A área de estudo está situada no município de Tomé-Açu, localizado na Mesorregião Nordeste do estado do Pará, posicionada nas coordenadas geográficas 2°25’00” S e 48°09’09” W. Possui área territorial de 5.145,361 km² e população de 60.604 habitantes (IBGE, 2021). As principais classes de solo mapeadas no município são Latossolos Amarelos; Latossolo Vermelho Amarelo; Argissolos Amarelos; Gleissolos; e Neossolos (EMBRAPA, 1999).

O clima da Região é mesotérmico e úmido, do tipo Ami de acordo com a classificação de Koppen (KOPPEN, 1936). A região em estudo apresenta três tipos de vegetação: 1) Floresta ombrófila densa das terras baixas; 2) Floresta ombrófila densa aluvial; e 3) Vegetação secundária, além de áreas de agricultura e pastagem (BDIA, 2021). Para realização deste estudo foram consideradas duas classes de uso e cobertura do solo no município de Tomé-Açu, sendo Floresta Primária (FST) e Sistemas Agroflorestais (SAFs), de acordo com a Figura 8.

Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo, SAFs do município de Tomé-Açu, Pará.



Fonte: Elaborado pela autora.

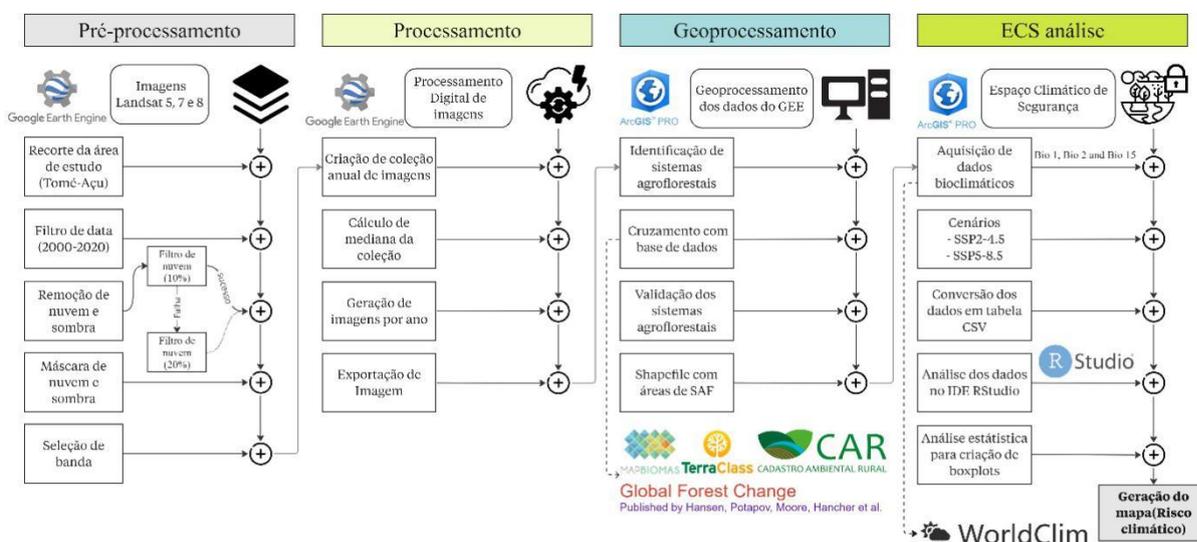
3.2.2 Classificação das áreas de SAFs

Para classificação das áreas de SAFs foram utilizadas algumas bases de dados públicas nacionais, de uso e cobertura da terra (Figura 2). Inicialmente, optou-se pela utilização da base do Cadastro Ambiental Rural (CAR), que apresentam áreas consolidadas, sendo necessário tratamento para seu refinamento e remoção das áreas degradadas ou desmatadas por meio da aplicação da base de dados. A base de dados de Hansen *et al.* (2013), que contém dados globais do satélite Landsat, com resolução espacial de 30 m, para caracterizar perda, ganho e extensão de áreas de floresta (Hansen *et al.*, 2013).

Realizou-se refinamento de dados, através da sobreposição da base de dados do TerraClass, de 2014, somada à base de dados do MapBiomas de 2020, e por fim uma classificação semiautomática do Sentinel 2 de 2020, para corroborar com as demais bases (Figura 9). O TerraClass foi utilizado para identificação de florestas primárias e secundárias, e para descontá-las da categoria de SAF. O MapBiomas foi utilizado para identificar e remover áreas de monocultura de Dendê, que se caracterizam por terem geometria bem definida e áreas extensas (superiores a 100 hectares).

Com base na resposta espectral dos alvos e nas classificações fornecidas pelas entidades responsáveis pela classificação do uso e cobertura da terra, áreas de floresta primária, floresta secundária, monocultura de dendê e pasto, foram identificadas e, por exclusão, as áreas remanescentes foram enquadradas como SAFs. O resultado foram 3.646 unidades amostrais, equivalentes a aproximadamente 110 mil hectares. Para garantir a precisão da identificação das áreas de SAFs realizou-se uma interpretação visual nas áreas remanescentes, para corrigir eventuais erros do cruzamento das bases de dados.

Figura 9 – Etapas metodológicas da Pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.3 Validação das áreas de SAFs

Para confirmação da classificação das áreas de SAFs, foram compilados estudos da literatura científica que identificam sistemas agroflorestais no município de Tomé-Açu (Miranda; Rodrigues, 1999; Barros *et al.*, 2009; Bolfe; Batistela, 2011; Pompeu, 2017; Reis, 2019; Santos *et al.*, 2020; Sousa *et al.*, 2022). Esses estudos foram úteis para compreender a textura e a assinatura das áreas de SAFs, dada sua alta heterogeneidade, as quais não seriam passíveis de classificação automática pelos classificadores tradicionais. A combinação dessas bases de dados permitiu uma identificação mais precisa desses sistemas no município de Tomé-Açu.

3.2.4 Dados climáticos

As variáveis bioclimáticas foram obtidas através da plataforma WorldClim (versão 2.1) disponível em <https://www.worldclim.org> (Fick; Hijmans, 2017). Esta base climática consiste em repositório gerado a partir de dados climáticos mensais, interpolados espacialmente para áreas terrestres globais, entre 1970 e 2000, para clima atual, em uma resolução espacial de ~10 km. Para esta pesquisa foram selecionadas as variáveis bioclimáticas Temperatura Média Anual (BIO1), Precipitação Acumulada Anual (BIO12) e Sazonalidade da Precipitação (BIO15).

3.2.5 Clima atual e futuro

As condições climáticas consideradas para a pesquisa foram as atuais, representadas pelos valores médios registrados em período climático de referência de 1970–2000 (FICK; HIJMANS, 2017). Para o futuro foram consideradas as projeções das variáveis bioclimáticas a partir dos cenários que incluem emissões de GEE, os SSPs (*Shared Socioeconomic Pathways*) propostos pelo IPCC, considerando dois cenários climáticos, um com expectativa intermediária de mudança climática (SSP2-4.5) e o outro pessimista (SSP5-8.5). Enquanto o SSP2-4.5 exibe mudanças menos extremas, o SSP5-8.5 sugere mudanças futuras levando a transformações significativas. Dentro destes cenários, foram considerados para a análise os seguintes períodos: (1) 2021-2040; (2) 2041-2060; (3) 2061-2080; e (4) 2081-2100.

3.2.6 Nível de exposição ao clima futuro

Avaliamos a exposição dos Sistemas Agroflorestais às mudanças climáticas usando a métrica baseada nos efeitos de BIO12 e BIO15. Para isto, tratamos os dados bidimensionais no software Excel e calculamos valores máximos e mínimos tolerados de exposição para cada variável (Nível de Exposição = Valor da variável no período X - valor da variável no cenário atual) para cada área de SAF, em cada um dos quatro períodos (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100), que identificamos através de inclusão de centroide; o que nos permitiu extrair os dados por unidade amostral, para um total de 3.679 áreas de SAFs.

A utilização do centroide foi realizada devido os diferentes tamanhos das áreas amostrais, de maneira que fosse permitido a obtenção dos dados bioclimáticos através dos polígonos no mapa e a partir das mesmas coordenadas do arquivo *raster* das áreas de SAF. Nesta etapa de aquisição, foi utilizada a ferramenta *Ensemble*, para redução de erros dos dados,

pois a abordagem do *Ensemble* baseia-se na premissa de que modelos distintos podem aprender padrões e relações diferentes nos dados. Assim, ao combinar as previsões desses modelos, é possível obter uma maior diversidade de informações e reduzir erros individuais. Essa estratégia torna essa ferramenta popular e eficaz em problemas de aprendizado de máquina e análise de dados, especialmente quando precisão e robustez são elementos-chave (Hastie; Tibshirani; Jerome, 2019).

O cálculo também permitiu a realização de análise binária através do seguinte julgamento: em caso de valores da variável bioclimática no período atual menores que a mesma variável em período futuro, admitiu-se 0, do contrário adotou-se 1. Dessa forma, obtivemos uma matriz binária pela qual os dados foram exportados para o software ArcGIS Pro, e através da ferramenta “*Bivariate Colors*” realizou-se a personalização da exibição dos resultados e cores apresentadas nos mapas.

3.2.7 Análise estatística

Os dados resultantes do processamento foram submetidos à análise de variância (ANOVA) no R (R Core Team, 2019), para avaliar se existe diferença estatisticamente significativa entre as variáveis bioclimáticas e diferentes períodos e cenários considerados, para um total de 3.679 unidades amostrais (Monstgomery; Peck; Vining, 2012). Com a utilização do pacote ggplot2 (Wickham, 2016), foi feita a representação dos resultados por meio de ‘box plot’ para comparação dessas variáveis em função dos cenários e períodos avaliados.

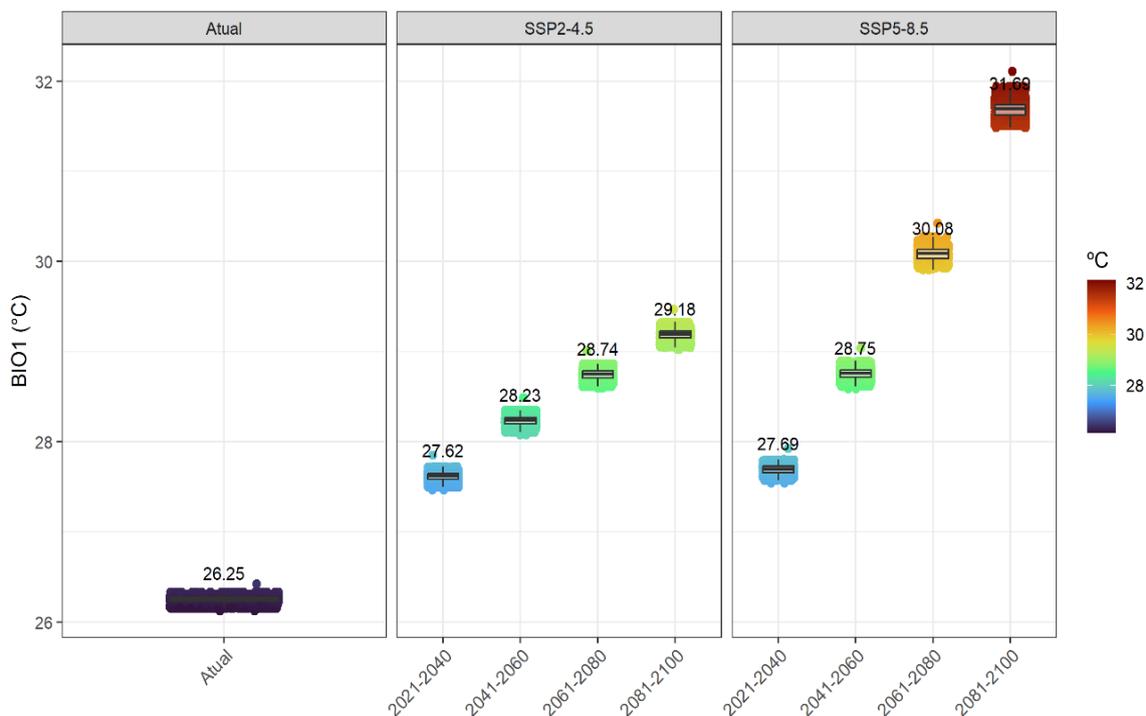
3.3 Resultados

O comportamento das variáveis por cenário e períodos avaliados estão apresentados na seguinte ordem: Temperatura média anual (BIO1), Precipitação acumulada (BIO12) e Sazonalidade de precipitação (BIO15), analisadas de forma independente.

Na Figura 10 é possível observar que tanto no cenário de menor impacto global como no de maior impacto, há um aumento considerável da temperatura, particularmente no último período (2081-2100). Destacamos que no cenário SSP2-4.5, a temperatura apresenta mínima em torno de 27,6 °C e máxima de 29,2 °C, sendo elevada de 0,4 a 0,6 °C a cada período de 20 anos, somando aumento de 1,56 °C. No cenário SSP5-8.5, observamos que a temperatura mínima é de aproximadamente 28,6 °C e máxima de 31,6 °C, com aumento gradativo de 1,0 a 1,6 °C,

resultando em aumento de 4°C até 2100. Em geral, o aumento da BIO1 é de 5,4 °C acima da média atual (Figura 3).

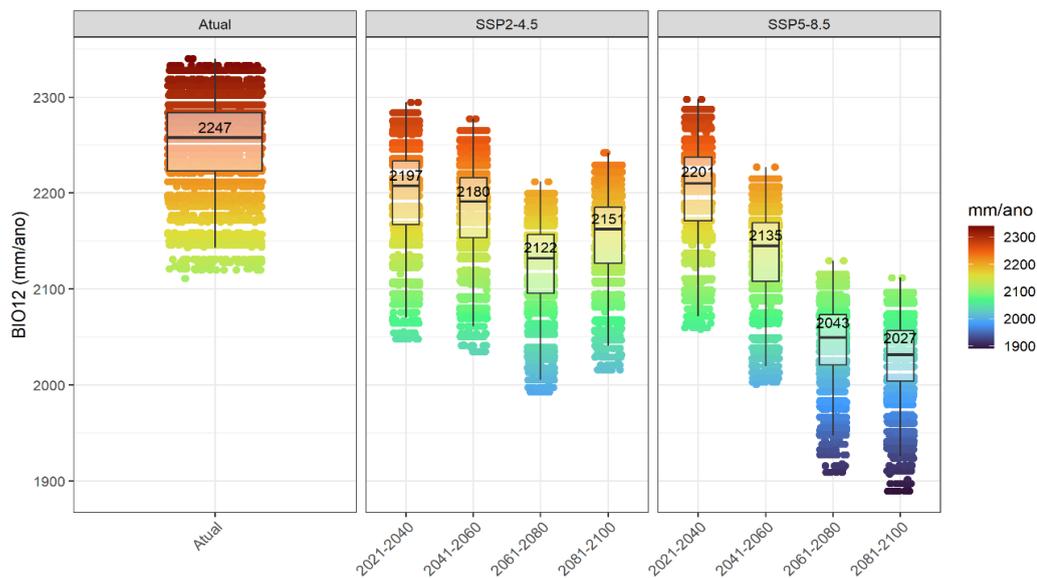
Figura 10 - Temperatura Média Anual (BIO1) nos cenários atual, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, nos períodos de 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100



Fonte: Elaborado pela autora.

Na figura 11, observou-se que a BIO12 tende a reduzir cerca entre 96 mm e 220 mm até o final do século do cenário intermediário (SSP2-4.5) para o mais pessimista (SSP5-8.5), respectivamente. O cenário SSP2-4.5, apresenta redução da precipitação nos períodos de 2021-2040 a 2061-2080, chegando à média de 2122 mm, com aumento para 2151 mm em 2081-2100. Para o cenário mais pessimista, a BIO12 apresenta padrão de redução constante de até 174 mm até final do século. De maneira geral, serão 220 mm a menos de chuva para a região.

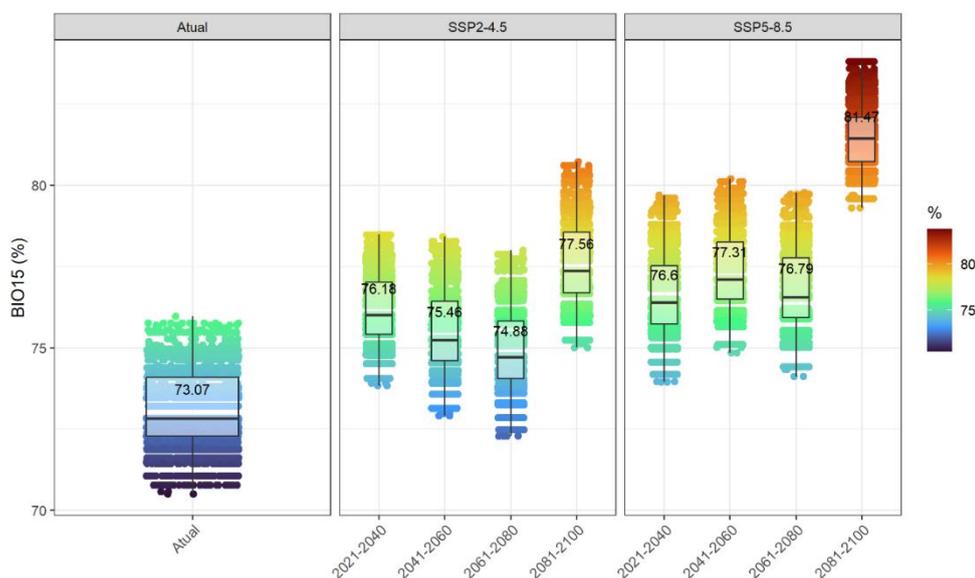
Figura 11 - Precipitação Acumulada (BIO12) nos cenários SSP2-4.5 e SSP 5-8.5 para os períodos atual, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.



Fonte: Elaborado pela autora.

No que se refere a BIO15, o aumento pode ser entre 4-8% de um cenário para o outro até o final do século. De modo que na análise do cenário SSP2-4.5, observa-se uma certa diminuição dessa variável nos primeiros 60 anos, com comportamento elevado somente no período de 2081-2100 (77,5%). No cenário SSP5-8.5, há um comportamento oscilatório de elevação e redução da sazonalidade por período avaliado, sendo destacado o final do século com maior sazonalidade apresentada, sendo 81,4% (Figura 12).

Figura 12 - Sazonalidade da Precipitação (BIO15) nos cenários SSP2-4.5 E SSP5-8.5 para os períodos atual, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

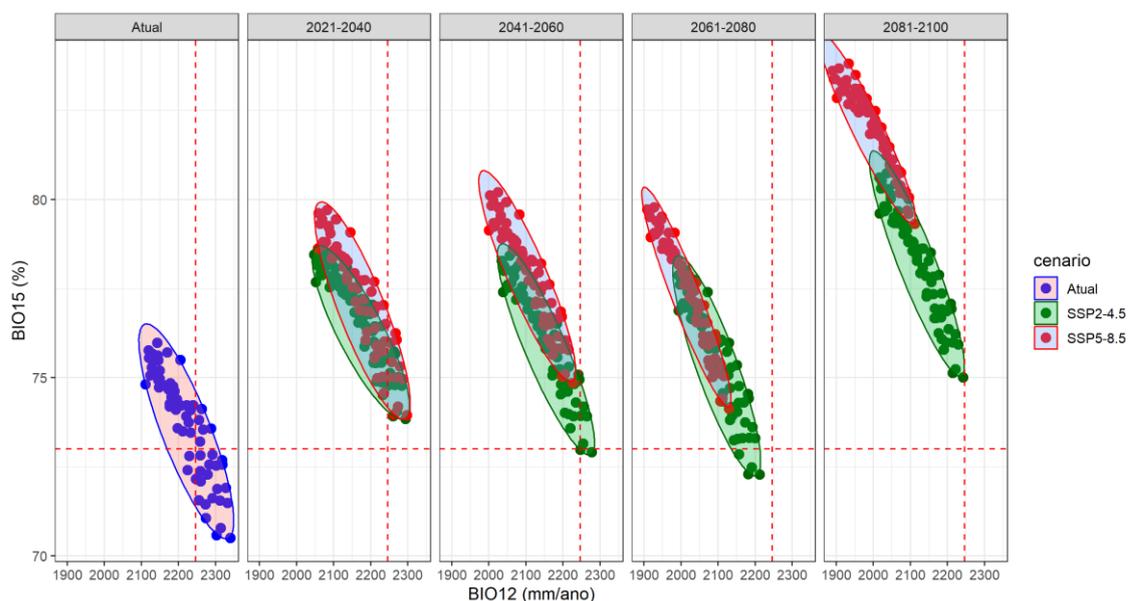


Fonte: Elaborado pela autora.

O espaço operacional climaticamente seguro para o desenvolvimento e garantia da produtividade dos SAFs pode ser observado através dos cenários e períodos avaliados, tendo o período atual como a referência (Figura 13), de maneira que se estende e limita as mínimas e máximas das variáveis BIO12 e BIO15, de 2100 a 2300mm e entre 70 e 77%, respectivamente. Os valores médios estão representados pelas linhas vermelhas tracejadas na horizontal (BIO12) e vertical (BIO15), logo quanto maior o deslocamento dos SAFs destas faixas por períodos e cenários avaliados, entende-se que haveria um maior risco e ameaça ao funcionamento desses agroecossistemas.

Observa-se que no cenário SSP2-4.5, nos 60 primeiros anos avaliados (2021-2040, 2041-2060 e 2061-2080), há deslocamentos consideráveis das condições climáticas em relação a BIO15 enquanto que para a BIO12 apresetaram-se pouco expressivos. Nota-se também que para os dois cenários nestes três períodos há sobreposição dos espaços climáticos, principalmente no período de 2021-2040, demonstrando condições climáticas semelhantes entre si e próximas das do período atual. O mesmo não ocorre para o período de 2081-2100, no cenário SSP2-4.5, sobretudo, para o mesmo período no cenário SSP5-8.5, onde se observa deslocamentos para valores extremos de redução de BIO12 e aumento da BIO15.

Figura 13 – Espaço Climático de Segurança em período atual em comparação a cenários SSP2-4.5 E SSP5-8.5 para os períodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

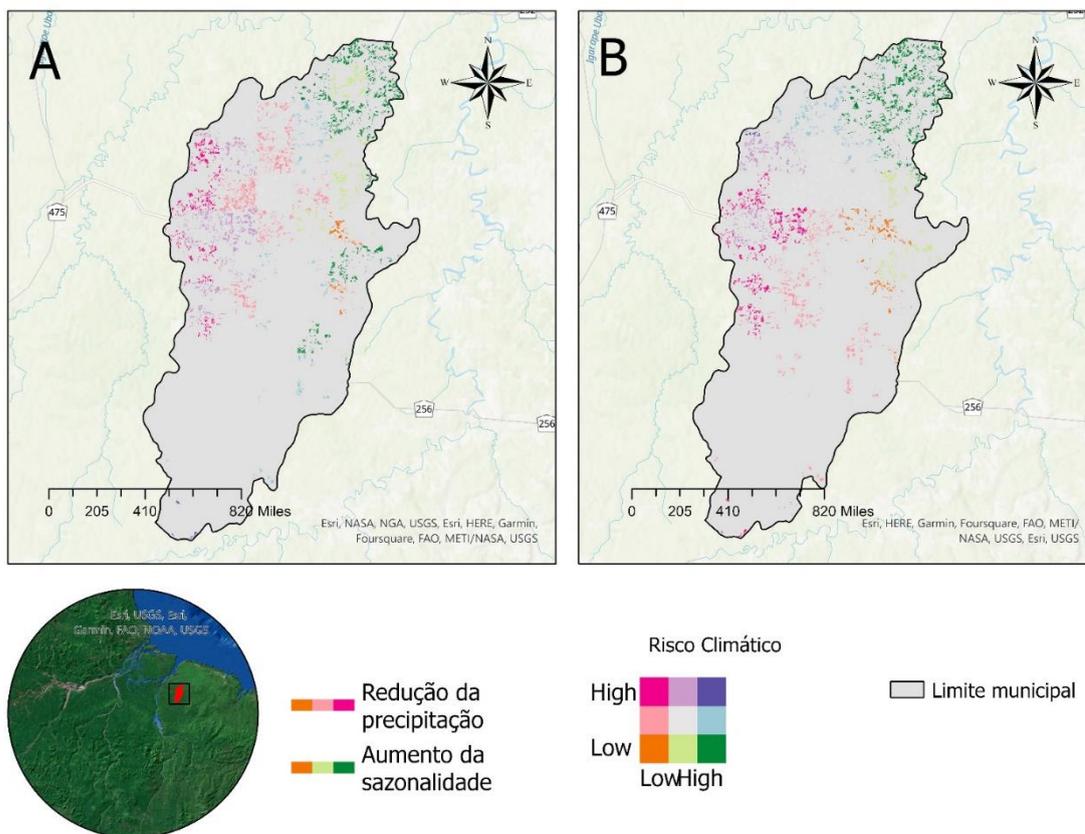


Fonte: Elaborado pela autora.

Na figura 14, observam-se dois mapas com plotagens de condições climáticas futuras em relação as BIO12 e BIO15 que demonstram como a distribuição local de climas percebidos muda nos próximos cenários SSP2-4.5 (A) E SSP5-8.5 (B) em períodos de 20 em 20 anos até o final do século XXI, com cores indicando níveis de exposição as mudanças dos climas não-análogos.

Dessa forma, é possível observar que há um aumento no número de áreas expostas a considerado aumento da sazonalidade da precipitação (tons de verde claro e escuro), principalmente ao norte de Tomé-Açu, do cenário intermediário para o pessimista. Na região noroeste, há uma crescente nas áreas que anteriormente estavam expostas a redução de precipitação e aumento da BIO15 em níveis medianos (rosa claro e lilás) para exposições extremas na redução de precipitação (rosa escuro). Embora sejam poucas, no sentido nordeste do município, é possível notar que áreas que apresentam riscos menores as exposições baixas em termos de redução de precipitação e aumento da sazonalidade (cor laranja), indicam acréscimo do cenário SSP2-4.5 para o SSP5-8.5. E somente no cenário mais pessimista observa-se exposições extremas para ambas as variáveis (cor roxa) (B).

Figura 14 - Avaliação da exposição dos SAFs baseada nas BIO12 e BIO15, em mapa bivariado.



*Notar que em (a) avalia-se cenário SSP2-4.5 e em (b) o cenário SSP5-8.5. A avaliação foi feita com base na linha de base (1970–2000) e dados de clima futuro para os períodos (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100).

Fonte: Elaborado pela autora.

De maneira geral, os SAFs do município de Tomé-Açu com a exposição às mudanças climáticas futuras, sofrerão com períodos mais longos de seca (verde escuro) e muitas áreas com a redução de precipitação medianas e altas (tons claros e escuros de rosa). Pouquíssimas áreas desfrutarão de condições mais amenas, com baixa redução da precipitação e baixa sazonalidade. Assim como condições medianas ou extremas dessas variáveis de maneira conjunto, tons cinza e roxo, respectivamente.

3.4 Discussão

3.4.1 Mudanças climáticas e seus impactos sobre os sistemas agroflorestais

De forma geral, os resultados desta pesquisa indicam um aumento da temperatura combinado com uma redução das chuvas e consequente aumento da sazonalidade da precipitação para as áreas de SAFs em Tomé-Açu até o final do século. As projeções indicam que a redução da precipitação e o aumento da temperatura serão pouco mais de 2x mais severos no cenário pessimista (SSP5-8.5) em comparação com o cenário intermediário (SSP2-4.5).

As mudanças climáticas podem interferir significativamente no ciclo de produção dos sistemas produtivos, implicando em menores safras e baixa qualidade dos produtos (Field; Barros, 2014), desencadear aumento da competição por água (Rosenzweig *et al.*, 2014) e causar grande impacto no desempenho da cultura.

A temperatura, assim como a umidade e concentração de CO₂ ambiente, afetam todos os organismos envolvidos em um sistema agroflorestal (Luedeling *et al.*, 2014). Em níveis extremos, afeta o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento em uma ampla gama de espécies. É possível observar que os resultados apresentam a temperatura como fator preocupante, sobretudo em cenário SSP5-8.5, visto que a alta desta variável prejudicará a produção nos agroecossistemas, uma vez que, há limites de temperatura e saturação atmosférica, acima dos quais os processos fisiológicos e de desenvolvimento e o rendimento tornam-se cada vez mais vulneráveis (Challinor *et al.*, 2005, Porter; Semenov, 2005).

Estudos de Porter e Semenov (2005), apresentam que temperaturas acima de 30 °C podem induzir a esterilidade do pólen e reduzir a produção de sementes ou frutos em cultivos diversos. Assim como há evidências de que os períodos de florescimento das plantas estão mudando em diferentes taxas como consequência do aumento da temperatura local e global, afetando inclusive interações entre espécies (Wheeler; Reynolds, 2013).

Como grande parte dos SAFs de Tomé-Açu têm como cultivo principal frutíferas (Kato *et al.*, 2012), com maior crescimento e interesse sobre açaizeiros e cupuaçuzeiros, e nos últimos anos são crescentes as áreas de SAFs contendo o componente cacau (Costa *et al.*, 2021). Esses cultivos, por serem de regiões tropicais, apresentam grande tolerância à altas temperaturas e a climas quentes. O açaí, por exemplo, apresenta limites térmicos entre 11,23 e 32,94°C. Fora dessa faixa térmica há efeitos prejudiciais no desenvolvimento da espécie (Sousa *et al.*, 2022).

No tocante a diminuição da precipitação prevista para os cenários futuros, sobretudo para o mais pessimista, ainda se encontram acima de 2000 mm. Apesar da evidente redução nos totais pluviométricos, nota-se que os níveis de precipitação estarão acima dos indicados para as

principais culturas componentes dos SAF's. De acordo com Lahive, Hadley e Daymond (2018), cultivos de cacau requerem índice pluviométrico acima de 1400 mm/ano. Em contrapartida, o aumento da sazonalidade da precipitação indica um prolongamento do período seco, o que pode provocar o aumento do déficit hídrico nessa época e prejudicar o desenvolvimento das plantas dos SAFs, com a necessidade de uma possível reposição hídrica através da irrigação.

Quanto ao aumento de sazonalidade da precipitação, prevê-se que essas mudanças provavelmente afetarão todos os componentes do sistema e podem até modular as interações entre os componentes. Pode-se assim esperar que tenha um impacto significativo no crescimento de cultivos, uma vez que as plantas mais jovens são mais sensíveis ao déficit hídrico do que as plantas mais maduras (Huang *et al.*, 2021). Além disso, sistemas de cultivo com mais de uma cultura são favorecidos pela alta precipitação anual, uma longa estação chuvosa e uma baixa variabilidade do início da estação chuvosa (Arvor *et al.*, 2014). Logo, esses sistemas de cultivo dependem criticamente das condições climáticas futuras.

3.4.2 Espaço operacional climaticamente seguro para os SAFs

Os resultados demonstram um certo contraste entre os dois cenários climáticos avaliados (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Embora observe-se que ao longo dos primeiros períodos utilizados (2021–2040, 2041–2060 e 2061-2080), o comportamento para ambos os cenários sejam semelhantes com sobreposição dos espaços climáticos, em faixas próximas as atuais. No período de 2081-2100, há forte divergência do cenário intermediário (SSP2-4.5) para o pessimista (SSP5-8.5), de maneira que os SAFs estarão expostos ao aumento da BIO1 e BIO15, combinados a redução da BIO12. Dessa forma, as áreas que operam satisfatoriamente bem em faixas de BIO12 entre 2250 mm e 2350 mm combinadas a faixas de BIO15 entre 70 e 72,5% poderão sofrer intensamente com as mudanças climáticas, enfrentando períodos longos de secas.

De acordo com a descoberta de Kummu *et al.* (2021), o crescimento rápido e ininterrupto das emissões de GEE no cenário SSP5–8.5, podem forçar um terço da produção global de alimentos para fora do espaço climático seguro, até final do século XXI. Pesquisas mostram que a perda de produção leva à perda de renda (Hertel, 2016; Mottaleb *et al.*, 2013) e também ao aumento de conflitos sociais. Além disso, com base em estudos de Hossain *et al.* (2016), a forte dependência da segurança alimentar é a principal motivação para selecionar e definir o espaço operacional climaticamente seguro para a produção agrícola em escala regional.

Observou-se que os SAFs, para garantir sua funcionalidade em função das mudanças climáticas, precisam apresentar resiliência a BIO12 abaixo de 2300 mm, chegando a 1900 mm em cenário pessimista e a BIO15 na faixa de 72,5% a 82,5%, para que assim consigam operar até 2100. Como cada agroecossistema apresenta particularidades baseadas na distribuição, tipo de cultivo, função e manejo, esses espaços climáticos seguros são faixas de limites para adaptações e desenvolvimento sustentável que garantam que sistemas produtivos operem diante das adversidades climáticas.

3.4.3 Exposição dos SAFS à cenários climáticos não-análogos

Os SAFs da região Tomé-Açu estão expostos a condições climáticas diferenciadas, de maneira que na região Oeste e Leste, em faixa diagonal, as variáveis avaliadas apresentam-se com baixas alterações, oferecendo condições mais favoráveis ao desenvolvimento e continuidade das atividades produtivas, quando comparadas as demais regiões do município. É interessante observar que no cenário mais pessimista (SSP5-8.5), essa condição favorecerá todas as áreas da região leste, até mesmo as que em cenário intermediário estavam expostas altas sazonalidades de precipitação, esse efeito pode estar relacionado ao potencial dos sistemas agroflorestais se adaptarem e fornecerem caminhos para garantir a segurança alimentar, ao mesmo tempo em que contribuem para a mitigação das mudanças climáticas (Mbow *et al.*, 2014).

Estudos demonstram que os SAFs propiciam maior conforto térmico ao mesmo tempo que garantem maior produtividade e rentabilidade para o produtor (Pires *et al.*, 2008). Também podem melhorar o desempenho agrícola, reduzindo a vulnerabilidade às variações do clima devido aos múltiplos benefícios que oferecem, dentre os quais se incluem os serviços ambientais (Altieri *et al.*, 2015). Atuam também como potenciais na redução da exposição, sensibilidade ou vulnerabilidade à variabilidade ou mudança climática, melhorando a capacidade de lidar com condições climáticas extremas (Neufeldt *et al.*, 2013).

3.5 Conclusão

Avaliada a exposição dos sistemas agroflorestais do município de Tomé-Açu às mudanças climáticas futuras, concluímos que nos cenários avaliados, ocorrerão aumentos de temperaturas, com mínimo de 1,56 °C e máximo de 5,4 °C acima da média atual, do cenário

intermediário para o mais pessimista. Paralelamente, haverá redução de precipitação acumulada de 96 mm a 220 mm até o final do século XXI. Enquanto que a sazonalidade aumentará um percentua de 14-8%, com destaque para o período entre 2081-2100. O espaço operacional climaticamente seguro para os SAFs se limita as mínimas e máximas das variáveis BIO12 e BIO15, de 2100 a 2300mm e entre 70 e 77%, respectivamente. Faixas que garantem o bom funcionamento destes sistemas em período atual, que estão sob ameaça para um futuro próximo, em especial em cenário SSP5-8.5, com valores extremos de redução de BIO12 e aumento da BIO15.

Destacamos também que, a exposição climática na região noroeste e centroeste de Tomé-Açu serão extremas com maior redução de precipitação e aumento da sazonalidade, enquanto que a região leste estará exposta a condições mais amenas, mas com alguns extremos na BIO15, que em cenário pessimista, reduzem de extremos para medianos e baixos, podendo indicar uma possível resposta dos SAFs às mudanças extremas, sendo um indicativo de que esses sistemas se mostram adaptáveis a mudanças futuras.

A metodologia do espaço operacional climaticamente através da utilização de sensores remotos como fonte primária de análise foi uma abordagem promissora neste estudo, fornecendo dados valiosos para avaliar a exposição dos SAFs às mudanças climáticas. No entanto, é importante reconhecer que essa metodologia pode ser aprimorada com o desenvolvimento contínuo de novas tecnologias, melhorias na coleta e processamento de imagens, bem como a aplicação de métodos estatísticos mais avançados para a análise dos dados.

Para estudos futuros na região avaliada, recomendamos enfaticamente, realizar pesquisas aprofundadas sobre estratégias de adaptação específicas para os SAFs, levando em consideração as mudanças climáticas projetadas. Isso pode envolver a seleção de espécies mais resistentes a implementação de práticas agrícolas sustentáveis no combate as mudanças climaticas.

Referências

- ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I.; HENAO, A.; LANA, M. A . Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. **Agron. Sustent. Dev.** v.35, p. 869–890, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>.
- ARTAXO, P. Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno?. **Revista USP**, v. 103, p. 13-24, 2014.
- ARVOR, D. *et al.* Spatial patterns of rainfall regimes related to levels of double cropping agriculture systems in Mato Grosso (Brazil). **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 8, p. 2622– 2633, 2014.
- CARDOZO, E.G *et al.* Sistemas agroflorestais recuperam o estoque de carbono das árvores mais rapidamente do que a sucessão natural na Amazônia Oriental, Brasil. **Agroforest Syst**, v. 96, p. 941–956, 2022.
- CERASOLI, F.; D'ALESSANDRO, P.; BIONDI, M. Worldclim 2.1 versus Worldclim 1.4: Climatic niche and grid resolution affect between-version mismatches in Habitat Suitability Models predictions across Europe. **Ecology and Evolution**, v. 12, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ece3.8430>. Acesso em: 02 mar. 2023.
- COSTA, F. A. *et al.* **Bioeconomia da sociobiodiversidade no estado do Pará**. Brasília, DF: The Nature Conservancy (TNC Brasil). Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), Natura, IDBTN-2264, 2021. 264p.
- DIFFENBAUGH, N.S. *et al.* Quantifying the influence of global warming on um-precedented extreme climate events. **Proc Natl Acad Sci USA**, v. 114, p. 4881–4886, 2017.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Brasília,DF: Embrapa Produção de Informação, 1999.
- FICK, S.E.; HIJMANS, R.J. WorldClim 2: novas superfícies climáticas com resolução espacial de 1 km para áreas terrestres globais. **Jornal Internacional de Climatologia**, v. 37, p. 4302-4315, 2017.
- FIELD, Christopher B.; BARROS, Vicente R. (ed.). **Impacts, adaptation and vulnerability: regional aspects**. Climate change 2014. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; JEROME, F. **Springer series in statistics the elements of**. 2019. Disponível em: <https://hastie.su.domains/Papers/ESLII.pdf>
- HERTEL, T. Food security under climate change. **Nature Clim Change**, v. 6, p.10–13, 2016.
- HOSSAIN, M.S. *et al.* Desvendando as inter-relações entre os serviços ecossistêmicos e o bem-estar humano no delta de Bangladesh. **Jornal Internacional de Desenvolvimento Sustentável e Ecologia Mundial**, v.24, n. 2, p. 120–134, 2016.

HUANG ZE, YU LIU, KAIYANG QIU, MANUEL LÓPEZ-VICENTE, WEIBO SHEN, GAO-LIN WU. Soil-water deficit in deep soil layers results from the planted forest in a semi-arid sandy land: Implications for sustainable agroforestry water management. *Agricultural Water Management*, Volume 254, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106985>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Banco de dados de informações ambientais-BDIA**. 2021. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/vegetacao>. Acesso em: 18 de Janeiro de 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Tomé-Açu: panorama**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/tome-acu/panorama>. Acesso em: 4 fev. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis report**. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, (in press), 2023.

KATO, O. R. *et al.* Desenvolvimento da produção de frutas em sistemas agroflorestais no estado do Pará. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA*, 22., 2012, Bento Gonçalves. **Anais[...]**. Bento Gonçalves: SBF, 2012.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. 1–44 p, parte C, 1936.

KUMMU, M. *et al.* Climate change risks pushing one-third of global food production outside the safe climatic space. **One Earth**, v. 4, n. 5, p. 720–729, 2021.

LAHIVE, F.; HADLEY, P.; DAYMOND, A.J. O impacto do estresse elevado de CO₂ e déficit hídrico no crescimento e fotossíntese de cacaueteiro (*Theobroma cacao* L.). **Photosynthetica**. v. 56, p. 911–92, 2018.

LUEDELING E. *et al.* Agroforestry systems in a changing climate—challenges in projecting future performance. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 6, p. 1-7, 2014.

MAHONY, C.R.; MACKENZIE, W.H.; AITKEN, S.N. Novel climates: trajectories of climate change beyond the boundaries of British Columbia's forest management knowledge system. **For Ecol Manage**, v. 410, p. 35–47, 2018.

MBOW, H. *et al.* Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 6 p. 8-14, 2014.

MILLY, P.C.D. *et al.* Climate change. Stationarity is dead: whither water management? **Science**, v. 319, p. 573–574, 2008.

MOTTALEB, K.A. Os efeitos dos desastres naturais na renda e nas despesas das famílias agrícolas: um estudo sobre produtores de arroz em Bangladesh. **Sistemas Agrícolas**, v. 121, p. 43–52, 2013.

NEUFELDT, H. *et al.* Beyond climate-smart agriculture: toward safe operating spaces for global food systems. **Agric & Food Secur** **2**, v.12, p. 1-6, 2013.

PIRES, M. F. A. *et al.* Physiological and behavioural parameters of crossbred heifers in single *Brachiaria decumbens* pasture and in silvopastoral system. *In: Livestock and Global Climate Change*, 2008, Hammamet/Tunisia. Proceedings... Hammamet/Tunisia: EEAP, 2008. p. 115-118.

PORTER JOHN, R.; SEMENOV MIKHAIL, A. Respostas das culturas à variação climática Phil. Trans. **R. Soc. B**, v. 360 p. 2021–2035, 2005.

QUANDT, A.; NEUFELDT H., GORMAN, K. Climate change adaptation through agroforestry: opportunities and gaps. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 60, p. 1-7, 2023.

R. CORE. **R**: uma linguagem e ambiente para computação estatística [Software de computador]. Fundação R para Computação Estatística. 2019.

RATAJCZAK, Z. *et al.* Mudança abrupta em sistemas ecológicos: inferência e diagnóstico. **Tendências Eco. Evolução**, v. 33, p. 513-526, 2018.

ROCKSTRÖM, J. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**, v. 14, n. 32, p. 1-35, 2009b.

ROCKSTRÖM, J. W. *et al.* 2009a. A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461(7263): p. 472-475, 2009a.

ROSENZWEIG, C. *et al.* Avaliando os riscos agrícolas das mudanças climáticas no século 21 em uma intercomparação global de modelos de culturas em grade. **Proc Natl Acad Sci**, v. 111, p. 3268–3273, 2014.

SHI, L. Sistemas agroflorestais: Meta-análise de estoques de carbono no solo, processos de sequestro e potenciais futuros. **Terra Degrad. Dev.** v. 29, p. 3886–3897, 2018.

SINGH, P.K.; CHUDASAMA, H. Pathways for climate resilient development: Human well-being within a safe and just space in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 68, p. 102277, 2021.

SLINGO Julia M. *et al.* Introduction: food crops in a changing climate. **Biological Sciences**, v. 360, p 1983–1989, 2005. <http://doi.org/10.1098/rstb.2005.1755>.

SMITH, P. *et al.* **Interlinkages between desertification, land degradation, food security and greenhouse gas fluxes**: synergies, trade-offs and integrated response options. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/09_Chapter-6.pdf Acesso em: 6 jan. 2023

SOUSA, D.P. *et al.* *Acai* palm base temperatures and thermal time requirements in eastern Amazon. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 57, p. 1-12, 2022.

STEFFEN, W. *et al.* Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, n. 347, p. 736-747, 2015.

STEFFEN, W. *et al.* Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. **Proc Natl Acad Sci USA**, v. 115, p. 8252–8259, 2018.

TITTENSOR D.P. *et al.* A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. **Science**, v. 346, p. 241–244, 2018.

VEERKAMP, C.J. *et al.* Future projections of biodiversity and ecosystem services in Europe with two integrated assessment models. **Reg Environ Change**, v. 20, p. 1-14, 2020.

WHEELER, T.; REYNOLDS, C. Predicting the risks from climate change to forage and crop production for animal feed. **Animal frontiers**. v. 3, p. 36-41, 2013.

WICKHAM, H. **ggplot2**: Gráficos elegantes para análise de dados. Nova York: Springer-Verlag, 2016.

YASIN G. *et al.* Role of Traditional Agroforestry Systems in Climate Change Mitigation through Carbon Sequestration: An Investigation from the Semi-Arid Region of Pakistan. **Land**, v. 12, p. 1-15, 2023.

ZOMER, R.J. *et al.* Global Tree Cover and Biomass Carbon on Agricultural Land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1-12, 2016.

CAPÍTULO 4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Como conclusão geral e integradora dos capítulos desta dissertação, foram obtidas respostas positivas aos questionamentos propostos sobre os sistemas agroflorestais (SAFs) na região de Tomé-Açu, Pará, e sua relação com as mudanças climáticas. Este estudo demonstra que os Sistemas Agroflorestais da Amazônia Oriental conseguem ter semelhanças notáveis do ponto de vista em termos de estrutura e funcionalidade, destaque para estabilidade no comportamento da biomassa acima do solo para essas áreas, no período de 2019-2020.

Além disso, ao analisar a exposição desses sistemas aos riscos climáticos até final do século, fica evidente que enfrentarão desafios significativos a redução na precipitação e aumento na temperatura e na sazonalidade da precipitação tendo efeitos diretamente sobre a aptidão da produção da região. No entanto, é encorajador notar que os SAFs têm a capacidade de ter um espaço operacional climaticamente seguro e apresentar um nítido comportamento de adaptação às novas condições climáticas, principalmente na região leste do município de Tomé-Açu. No mais, o uso de sensoriamento remoto e dados criteriosamente selecionados revelou-se uma abordagem promissora para avaliar a estrutura do dossel e a fenologia foliar dos SAFs, com base no Enhanced Vegetation Index (EVI). Isso permitiu comparar as variáveis deste estudo com outras fontes de dados e localizar com precisão as áreas de SAF no município. No entanto, é importante reconhecer as limitações dessa metodologia, incluindo a necessidade de estudos mais robustos, delimitando áreas de classificação supervisionada para minimizar erros e interferências de dados, assim como etapas de campo para maior compreensão e análise das diversificadas áreas de SAFs na região.

Os resultados deste estudo indicam que os sensores remotos são ferramentas valiosas, mas não isentas de limitações, para o estudo da estrutura e da fenologia dos SAFs. Portanto, recomenda-se a realização de estudos futuros que combinem métodos de amostragem de campo com sensores remotos para aprimorar a precisão das estimativas. Além disso, futuras pesquisas na região avaliada podem se concentrar em aspectos adicionais, como a estimativa da biomassa abaixo do solo, a avaliação da biodiversidade e os impactos dos SAFs no clima e no meio ambiente. Essas investigações são fundamentais para entender o papel dos SAFs na conservação da biodiversidade e na mitigação das mudanças climáticas.

Finalmente, os resultados desta pesquisa contribuem com estágio inicial de estudos para o estabelecimento de práticas de conservação e incentivo de políticas públicas que evitem que cenários mais críticos de mudanças climáticas ocorram para a região amazônica.

REFERÊNCIAS

- ABDULAI, I *et al.* A agrossilvicultura de cacau é menos resistente a climas subtópicos e extremos do que o cacau em pleno sol: resposta a Norgrove (2017). **Glob. Chang. Biol**, v. 24, p. 733-735, 2018.
- ALTIERI, M.; NICHOLLS, C. I. O potencial agroecológico dos sistemas agroflorestais na América Latina. **Revista Agriculturas: Experiências em Agroecologia**, v. 8, n. 2, p. 31-34, 2011.
- ARTAXO, Paulo. Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno? **Revista USP**, n. 103, p. 13-24, 2014.
- ASSAD, E. D. *et al.* “Papel do Plano ABC e do Planaveg na adaptação da agricultura e da pecuária às mudanças climáticas”. **Working Paper**. São Paulo, Brasil: WRI Brasil. 47 p. 2019. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/publicações>. Acesso em: 10.out.2022
- BARKHORDARIAN, A *et al.* A recent systematic increase in vapor pressure deficit over tropical South America. **Scientific Reports**, v. 9, p. 1-12, 2019.
- BATISH, D. R *et al.* **Ecological basis of agroforestry**. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- BRASIL. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**. MAPA/ACS, 2012.
- BEENHOUWER, M.de; AERTS, R.; HONNAY, O. A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem services benefits of coffee and cacao agroforestry. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 175, p. 1-7, 2013.
- BOLFE, Édson Luis. **Desenvolvimento de uma metodologia para a estimativa de biomassa e de carbono em sistemas agroflorestais por meio de imagens orbitais**. 2010. 233f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2010.
- BOLFE, E. L.; BATISTELLA, M. Análise florística e estrutural de sistemas silviagrícolas em Tomé-Açu, Pará. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.46, n.10, p.1139-1147, 2011.
- BRIENEN, R. J. W. *et al.* Long-term decline of the Amazon carbon sink. **Nature**, v. 519, n. 7543, p. 344–348, 2015.
- BRITZ, R.M. *et al.* **Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas comênfase na floresta atlântica do Sul do Brasil**. Colombo: EMBRAPA, 2006.
- BROWN, S. **Biomass estimation and biomass change in tropical forests: a primer**. by the food and agriculture organization of the United Nations. Rome, 1997. 134p. (FAO Forestry Paper).
- COOPERATIVA AGRÍCOLA MISTA DE TOMÉ-AÇU-CAMTA-CAMTA. **Tomé-Açu: imigração japonesa em Tomé-Açu, 1929-1999**. Tomé-Açu: CAMTA, 1999. 15p.

COOPERATIVA AGRÍCOLA MISTA DE TOMÉ-AÇU-CAMTA. História e Produtos. Disponível em: <https://www.camta.com.br/>. Acesso em: 5 jun. 2021.

CASSOL, H.L.G. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila mista com uso de dados ópticos de sensores remotos**. 2013. 143f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CHAVE, J. *et al.* Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, Berlin, v. 145, p. 87-99, 2005.

DIKMEN, S. *et al.* “The SLICK hair locus derived from Senepol cattle confers thermotolerance to intensively managed lactating Holstein cows Journal of Dairy”. **Science**, v. 97, p. 5508–5520, 2014.

DUGUMA, L.A.; MINANG, P.A.; VAN NOORDWIJK, M. Climate change mitigation and adaptation in the land use sector: From complementarity to synergy. *Environ. Manag.* v. 54, p. 420–432, 2014.

ELAGIB, N. A.; AL-SAIDI, M. Balancing the benefits from the water-energy-land Food nexus through agroforestry in the Sahel. **Elsevier B.V.**, v. 742, p. 140509, 2020.

ENGEL, V. L. **Introdução aos sistemas agroflorestais**. Botucatu: FEPAF, 1999.

ESQUIVEL-MUELBERT, A *et al.* Compositional response of Amazon forests to climate change. **Global Change Biology**, n. 25, v. 1, 39-56, 2019.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **User guides - Sentinel-2 MSI - Revisit and 63 Coverage - Sentinel Online**. 2020. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/userguides/sentinel-2-msi/revisit-coverage>. Acesso em: 22 jun. 2022.

FAVERO, C.; LOVO, I. C.; MENDONÇA, E. S. Recuperação de área degradada com sistema agroflorestal no Vale do Rio Doce, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, p. 861 - 868, 2008.

FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I.; PEREIRA, V. B. Emissões de gases do efeito estufa por desmatamento e incêndios florestais em Roraima: fontes e sumidouros. **Revista Agro@mbiente**, v. 7, n. 1, p. 95-111, 2013.

FOODY, G. M. Remote sensing of tropical forest environments: Towards the monitoring of environmental resources for sustainable development. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 20, p. 4035–4046, 2003.

FOODY, G. M. *et al.* Satellite remote sensing to monitor species diversity: potential and pitfalls. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, v.2, p. 25-36, 2015.

- GANDOLFI, S.; JOLY, C. A.; RODRIGUES, R. R.; MARTINS, S. V. Forest restoration: many views and objectives. *In*: RODRIGUES, R. R.; MARTINS, S. V.; GANDOLFI, S. (eds.). **High diversity forest restoration in degraded areas**. New York: Nova Science Publishers, 2007, p. 3-26.
- GARCIA, R.A. *et al.* Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. **Science** (80-). v. 344, 124, p. 1-10, 2014.
- HANSEN, M. C. *et al.* High-resolution global maps of 21st-Century Forest Cover Change. **Science**, v. 342, n. 6160, p. 850–853, 2013.
- HARVEY, C.A. *et al.* Climate-smart landscapes: opportunities and challenges for integrating adaptation and mitigation in tropical agriculture. **Conserv. Lett**, v. 7, 77–90, 2014.
- HARRIS, N. L. *et al.* Mapas globais dos fluxos de carbono das florestas do século XXI. **Natureza Mudanças Climáticas**, v. 11 , p 234–240. 2021.
- HOMMA, A. K. O. **Amazônia: meio ambiente e desenvolvimento agrícola**. Brasília,DF: Embrapa Informação Tecnológica; Belém: Embrapa-CPATU, 1998.
- HOMMA, A. K. O. Dinâmica dos sistemas agroflorestais: o caso da Colônia Agrícola de Tomé-Açu, Pará. **Revista Instituto de Estudos Superiores da Amazônia**, Belém v. 2, n. 1/2, p. 57-65, 2004.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p. 295- 309, 1988.
- HUETE, A. *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, [S. 1.], v. 83, n. 1, p. 195–213, 2002.
- HOUGHTON, R. A. *et al.* Carbon emissions from land use and land-cover change. **Biogeosciences**, v. 9, n. 12, p. 5125–5142, 2012.
- IMAZON. Waters initiative. **The main stem**. 2021 (no prelo). Disponível em: <https://amazon.org.br>. Acesso em: 15 maio 2022.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. **Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability**. 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FrontMatter.pdf Acesso em: 23 maio 2022.
- JOHNSON, M. O. *et al.* Variation in stem mortality rates determines patterns of aboveground biomass in Amazonian forests: implications for dynamic global vegetation models. **Global Change Biology**, v. 22, n. 12, p. 3996–4013, dez. 2016.
- JUSTICE, Christopher O. *et al.* The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S. 1.], v. 36, n. 4, p. 1228–1249, 1998.
- LIN, B.B. Manejo agroflorestal como estratégia adaptativa contra potenciais MIEXTREMOS croclimáticos na cafeicultura. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 144, p. 85–94, 2007.

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon tipping point. **Science Advances**, v. 4, n.2, eaat2340. 2018. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>.

LU, D.S.; BATISTELLA, M.; MORAN, E. Satellite estimation of aboveground biomass and impacts of forest stand structure. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.71, p. 967-974, 2005.

MALLHI, Yadvinder. O conceito do antropoceno. **Revisão Anual do Meio Ambiente e Recursos**. v. 42, p. 77-104, 2017.

MANZATTO, C. V. *et al.* **Mitigação das emissões de gases de efeitos estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC**: estimativas parciais. Jaguariúna: Embrapa, Meio Ambiente, 2020.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SALATI, E.; AMBRIZZI, T. **Caracterização do clima de referência e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**: sumário técnico. Brasília, DF: MMA, SBF, DCBio, 2007. 50 p.

MARSDEN, C., MARTIN-CHAVE, A., CORTET, J.; HEDDE, M.; CAPOWIEZ, Y. How agroforestry systems influence soil fauna and their functions - a review. **Plant Soil**, v. 453, p.29–44, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04322-4>.

MAY, P. H.; TROVATTO, C. M. M. **Manual agroflorestal para a Mata Atlântica**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Agrário, Secretaria de Agricultura Familiar, 2008.

MEDINA SOTOMAYOR, J.F. **Determinação de biomassa aérea em florestas nativas num ambiente agrícola do Estado de São Paulo**. 2013. 129f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2013.

MIRANDA, D.L.C. **Modelos matemáticos de estoque de biomassa e Carbono em áreas de restauração florestal no sudoeste paulista**. 2008. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MONTAGNINI, F.; NAIR, P.K.R. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**. v. 61, p. 281-295, 2004.

OBSERVATÓRIO ABC. **Propostas para revisão do Plano ABC**. 2015. Disponível em: <http://observatorioabc.com.br/>. Acesso em: 05 jan. 2021.

OECD STAT. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015-2024**. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/19991142> Acesso em: 14 jun 2022.

OECD-FAO. **Agricultural Outlook 2020-2029**. Disponível em: <https://www.cicarne.com.br/wp-content/uploads/2020/07/Outlook-OCDE-FAO-2020-29.pdf> Acesso em: 14 jun 2022.

O`FARRELL, P. J., ANDERSON, P. M. L. Sustainable multifunctional landscapes: a review to implementation. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 2, p. 59–65, 2010.

PEREIRA NETO, J. A. **Estoques de carbono em sistemas agroflorestais de cacaueteiro como subsídios a política de serviços ambientais**. 2012. 212 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável do Tropicó Úmido) – Universidade Federal do Pará- Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Belém, 2012.

RAY, D. K. *et al.* Climate variation explains a third of global yield variability. **Nature Communications**, v. 6, p. 1-9, 2015.

ROSENSTOCK, T.S. *et al.* Making trees count: Measurement and reporting of agroforestry in UNFCCC national communications of non-Annex I countries. **Agric. Ecosyst. Environ.** v. 284, p. 1-10, 2019.

RUIZ-DE-OÑA, C.; MERLÍN-URIBE, Y. New Varieties of Coffee: Compromising the Qualities of Adaptive Agroforestry? A Case Study From Southern Mexico **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 1-17, 2021.

SCHEMBERGUE, A. *et al.* Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil 2. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, p. 9-30, 2017.

SCHWAB, M., “**The virtual institute of integrated climate and landscape evolution analyses - ICLEA**”. [S.l.; s.n], 2014.

SALLO, F. S. *et al.* Estimativa de componentes do balanço de radiação em diferentes tipos de uso e cobertura do solo. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 9, n. 2, p. 347-358, 2014.

SILVA, V. da; Pereira, P. **Sistemas agroflorestais para recuperação de matas ciliares em Piracicaba, SP**. 2002. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUDA (SEEG). **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019**, 2020. Relatório 8. Disponível em: <http://www.observatoriodoclima.eco.br/> . Acessado em: 5 abr. 2022.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). SEEG Coleção 6 - **Estimativas de emissões de gases de efeito estufa do Brasil**. São Paulo: **Observatório do Clima**, 2018. Disponível em: <http://www.observatoriodoclima.eco.br/>. Acessado em: 10 abr. 2022.

SOMARRIBA, E. *et al.* Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. **Agriculture Ecosystems Environment**, v. 173, p. 46–57, 2013.

SOUZA, H.N. *et al.* Sombra protetora, diversidade arbórea e propriedades do solo em sistemas agroflorestais cafeeiros no bioma Mata Atlântica. **Agrícola Ecosystems. Ambiente**. v. 146, 179–196, 2012.

SUBCOMMISSION ON QUATERNARY STRATIGRAPHY-SQS. **Working group on antropocene**, 2009. Disponível em: <http://quaternary.stratigraphy.org/working-groups/antropocene/>. Acessado em: agosto. 2021.

TORQUEBIAU, E. F. A renewed perspective on agroforestry concepts. **C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie /Life Science**, v. 323, p. 1009-1017, 2000.

UMRANI, R.; JAIN, C. K. **Agroforestry systems and practices Jaipur**. Oxford: Book Company, 2010.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION-UNISDR. Centre For Research on the Epidemiology of Disasters-CRED. **The human cost of weather-related disasters 1995-2015**. Brussels; Geneve: CRED; EM-DAT; UNISDR, 2015. Disponível em: <https://www.undrr.org/quick/11451> Acesso em: 5 ago. 2022.

VAN NOORDWIJK, M. *et al.* Agroforestry solutions for buffering climate variability and adapting to change. *In: CLIMATE change impact and adaptation in agricultural systems*. Wallingford, UK: CAB-International, 2014. p. 216–232.

VIGNOLA, R. *et al.* Ecosystem-based adaptation for smallholder farmers: definitions, opportunities and constraints. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 211, p. 126-132, 2015.

WEISSE, M.; GOLDMAN, L. Forest loss remained stubbornly high in 2021 global. **Global Forest Review**. 2021. Disponível em: <https://research.wri.org/gfr>. Acesso em: 22 mar. 2022.

WILLIAMS, J.W.; JACKSON, S.T.; KUTZBACH, J.E. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. **PNAS**, v. 104, n. 14, p.5738-5742, 2007.

YAMADA, M. Uma breve história de desenvolvimento agroflorestal Nikkei na Amazônia: o caso da colônia de Tomé-Açu. *In: PORRO, R. (ed.). Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação*. Brasília, DF: Embrapa, 2009. p.691-704.

ZOMER, R.J. *et al.* Global tree cover and biomass carbon on agricultural land: the contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. **Sci. Rep.** v. 6, p. 1-12, 2016.