

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO
AGROECOLÓGICA: DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO SAF3D PARA
PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE ARRANJOS PRODUTIVOS**

Bruno Mazanatti de Oliveira Lutti

DOURADOS-MS

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO
AGROECOLÓGICA: DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO SAF3D PARA
PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE ARRANJOS PRODUTIVOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade Federal da Grande Dourados – Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia, para obtenção do Título de Mestre em Agronegócios.

Linha de Pesquisa: Bioeconomia

Discente: Bruno Mazanatti de Oliveira Lutti

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Madalena Maria Schlindwein

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Luis Casarotto

DOURADOS-MS

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

L974m Lutti, Bruno Mazanatti De Oliveira
MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO
AGROECOLÓGICA: DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO SAF3D PAEA
PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE ARRANJOS PRODUTIVOS [recurso eletrônico] /
Bruno Mazanatti De Oliveira Lutti. -- 2026.
Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Madalena Maria Schlindwein.
Coorientador: Eduardo Luis Casarotto.
Dissertação (Mestrado em Agronegócios)-Universidade Federal da Grande Dourados,
2026.
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. bioeconomia. 2. sistemas agroflorestais. 3. SAF3D. I. Schlindwein, Madalena Maria.
II. Casarotto, Eduardo Luis. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal da Grande Dourados
Pró-Reitoria de Pós-Graduação
Coordenadoria de Pós-Graduação



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA POR BRUNO MAZANATTI DE OLIVEIRA LUTTI, ALUNO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO "AGRONEGÓCIOS E SUSTENTABILIDADE".

Aos seis dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e seis, às nove horas, em sessão pública, realizou-se na Universidade Federal da Grande Dourados, a Defesa de Dissertação de Mestrado intitulada **"Modelagem tridimensional de sistemas de produção agroecológica: Desenvolvimento do artefato SAF3D para Planejamento e Otimização de arranjos produtivos."**, apresentada pelo mestrando Bruno Mazanatti de Oliveira Lutti, do Programa de Pós-graduação em Agronegócios, à Banca Examinadora constituída pelos membros: Prof.ª Dr.ª Madalena Maria Schlindwein/UFGD (presidente/orientadora), Prof. Dr. Rafael Martins Noriller/UFGD (membro titular interno), Prof. Dr. Milton Parron Padovan/EMBRAPA (membro titular externo). Iniciados os trabalhos, a presidência deu a conhecer ao candidato e aos integrantes da banca as normas a serem observadas na apresentação da Dissertação. Após o candidato ter apresentado a sua Dissertação, os componentes da Banca Examinadora fizeram suas arguições. Terminada a Defesa, a Banca Examinadora, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo sido o candidato considerado aprovado. Nada mais havendo a tratar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Dourados/MS, 06 de março de 2026.

Documento assinado digitalmente
MADALENA MARIA SCHLINDWEIN
Data: 10/03/2025 16:07:07-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.ª Dr.ª Madalena Maria Schlindwein
Presidente/orientadora

Documento assinado digitalmente
RAFAEL MARTINS NORILLER
Data: 06/03/2026 17:34:27-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Martins Noriller
Membro Titular Interno

Prof. Dr. Milton Parron Padovan
Membro Titular Externo

(PARA USO EXCLUSIVO DA PROPG)

EPÍGRAFE

“Não sois máquinas! Homens é que sois!”

Charlie Chaplin

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, à minha mãe, exemplo de força, dignidade e amor incondicional, cuja trajetória de vida sempre foi minha maior inspiração para perseverar diante dos desafios.

À minha esposa, pelo apoio permanente, compreensão nos momentos difíceis e estar ao meu lado com coragem e confiança. Ao meu filho, razão da minha vida.

Aos meus professores, especialmente à minha orientadora, que contribuem para minha formação acadêmica e humana. Cada orientação, crítica e ensinamento foram fundamentais para esta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

À minha família, a mais sincera gratidão. Aos meus pais, pelo amor, valores ensinados e incentivo permanente aos estudos. À minha mãe Vera, a primeira professora, doutora, exemplo de dedicação. À minha esposa Aline, professora, doutora, companheira incansável, pelo apoio, paciência e compreensão nos momentos mais desafiadores; e ao meu filho Pedro, fonte de inspiração diária e razão maior do meu ser.

Agradeço à minha orientadora professora Madalena, doutora, pela generosidade intelectual e excelência acadêmica, suas orientações foram fundamentais para a construção desta dissertação. Jamais esquecerei a força dada, a compreensão, o carinho e a atenção especial que tem por todos os orientandos. Ao professor Eduardo, pelas dicas, o apoio, a disposição e a cobrança para melhorar e avançar na metodologia. Ao professor Milton Padovan, pelas orientações on-line fundamentais para o seguimento da pesquisa. Aos professores Antonio e Rafael, pela confiança e disponibilidade.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Agronegócios. Aprendi demais, como nunca, inclusive aqueles com quem não realizei disciplinas. Grato para sempre. Meu sincero reconhecimento pela dedicação, rigor científico e compromisso com a formação crítica a cada um.

Especialmente às minhas colegas de caminhada, Ana Paula (UFGD) e Ana Paula (UEMS), que me apoiaram na reta final de escrita do texto, sem vocês, eu não conseguiria. Obrigado! Aos colegas Edson, Breno e toda equipe EAD-UEMS, agradeço a força, dedicação e parceria. Pelas trocas construtivas de conhecimento e apoio mútuo ao longo do percurso. Estendo minha gratidão, para toda a comunidade acadêmica UEMS–UFGD. Aos meus colegas de mestrado e, aos doutorandos, alguns já doutores. Cláudia, Laynara, Lethicia, Jamel, Giseli, Gabrielli e Allison, Ana Paula, Luciele e Nelson, Willian, Maurício, Rafael, Givago, Marcos, Muhamaad, Isabela, Lorrana, Larissa e Nelson, Iva e Pedro, Cristiane, Pablo, Denise, Larissa, André, Heitor, Anderson, Daniel, Cláudio, Marcelo, e todos os demais colegas, estão no meu coração. Um grupo sensacional e inesquecível. Um beijo no coração de todos vocês, especialmente de duas grandes amigas de UEMS e UFGD, Marília e Edilene. Gratidão a todos os meus amigos e amigas, são os melhores que alguém pode ter. Ao meu maior amigo, meu irmão Lucas. E a minha sogra Durvalina, sem ela não teria meu bem mais precioso, meu filho Pedro.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	23
1.1.1 Objetivo Geral	23
1.1.2 Objetivos Específicos	23
1.2 JUSTIFICATIVA	24
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E AGRICULTURA DIGITAL	26
2.2 SISTEMAS AGROFLORESTAIS: COMPLEXIDADE ESTRUTURAL E DEMANDA POR MODELAGEM	27
2.3 POLÍTICAS PÚBLICAS DE INCENTIVO E O PROGRAMA AGROFLORESTAR MS	28
2.4 AGRICULTURA DIGITAL E TECNOLOGIAS EMERGENTES DE MONITORAMENTO E REPRESENTAÇÃO	29
2.5 MODELAGEM COMPUTACIONAL APLICADA A SISTEMAS AGROECOLÓGICOS	30
2.6 DESENVOLVIMENTO DE ARTEFATOS COMPUTACIONAIS: ENGENHARIA DE SOFTWARE E DESIGN SCIENCE RESEARCH	33
2.7 PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE ARRANJOS PRODUTIVOS	34
2.8 SÍNTESE INTEGRADORA E LACUNA CIENTÍFICA	35
3. MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1 DELINEAMENTO METODOLÓGICO GERAL DA PESQUISA	38
3.2 ANÁLISE DA PERCEPÇÃO DE AGROFLORESTORES SOBRE TECNOLOGIAS DIGITAIS EM SAFS	39
3.2.1 Delineamento do estudo	39
3.2.2 Seleção da amostra	40
3.2.3 Coleta e análise de dados	42
3.3 LEVANTAMENTO E ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SAF3D	44
3.4 MODELAGEM EM UML PARA O DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO SAF3D	45
3.4.1 Delineamento da pesquisa	45
3.4.2 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA: DESIGN SCIENCE RESEARCH	46

3.4.3 Etapas metodológicas.....	47
3.4.4 Análise cienciométrica e bibliométrica.....	47
3.4.5 Aplicação da técnica de <i>Snowball Sampling</i>	49
3.4.6 Fluxo metodológico da revisão.....	50
3.4.7 Desenvolvimento da modelagem UML do artefato SAF3D.....	51
3.5 ARQUITETURA DO SISTEMA SAF3D.....	52
3.6 VALIDAÇÃO DO ARTEFATO SAF3D.....	53
3.7 SÍNTESE METODOLÓGICA: RELAÇÃO ENTRE OBJETIVOS E ETAPAS.....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1 PERCEPÇÃO DE AGROFLORESTORES SOBRE O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS EM SAFS.....	55
4.1.1 Ferramentas digitais identificadas previamente ao desenvolvimento do SAF3D.....	56
4.1.2 Percepção dos agroflorestores sobre o uso de tecnologias digitais.....	61
4.1.3 Comparação entre agroflorestores: estratificação, planejamento e uso de tecnologias digitais.....	63
4.1.4 Fatores que influenciam a adoção das tecnologias.....	64
4.1.5 Adaptação das ferramentas digitais à realidade dos SAFs.....	65
4.1.6 Classificação dos sistemas agroflorestais e aplicação ao SAF3D.....	66
4.2 RESULTADOS DO LEVANTAMENTO E ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SAF3D.....	67
4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA E BIBLIOMÉTRICA.....	68
4.4 MODELAGEM UML DO ARTEFATO SAF3D: RESULTADOS.....	71
4.5 ARQUITETURA DO SAF3D: RESULTADOS.....	74
4.6 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO ARTEFATO SAF3D.....	77
4.7 SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	78
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
REFERÊNCIAS.....	82
ANEXO I – VÍDEOS DA PESQUISA (YOUTUBE®).....	87

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROECOLÓGICA: DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO SAF3D PARA PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE ARRANJOS PRODUTIVOS

RESUMO - Esta dissertação analisa o papel das tecnologias digitais na modelagem, planejamento e gestão de Sistemas Agroflorestais (SAFs) biodiversos, articulando a percepção de agroflorestores experientes com o desenvolvimento de um artefato computacional, o SAF3D. Inicialmente, investigou-se como agricultores percebem e incorporam ferramentas digitais em seus sistemas produtivos, identificando que tais tecnologias são reconhecidas como instrumentos estratégicos para organização espacial, planejamento sucessional e monitoramento produtivo, desde que complementem o conhecimento empírico acumulado. A adoção ocorre de forma seletiva e crítica, sendo influenciada por fatores como escolaridade, experiência prévia, complexidade do sistema e suporte institucional, além de limitações relacionadas à infraestrutura rural e à integração com dados de campo em tempo real. Com base nessas evidências, na análise cienciométrica e bibliométrica da produção científica sobre o tema e na especificação formal de requisitos funcionais, não funcionais e atores do sistema, desenvolveu-se, segundo os princípios da Design Science Research, uma modelagem UML estruturada em arquitetura modular, para representar a estratificação vertical e integrar componentes produtivos e ecológicos dos SAFs em ambiente tridimensional. O artefato demonstrou capacidade de integrar dados de múltiplas fontes (GIS, LiDAR e DEM), simular cenários de crescimento e sucessão agroecológica, identificar lacunas estruturais e otimizar consórcios de espécies e práticas de manejo. Comparativamente a abordagens bidimensionais, apresentou maior precisão na estimativa de área de copa, biomassa aérea e distribuição de luz. A validação conceitual, estrutural e funcional confirmou sua consistência e aplicabilidade como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Conclui-se que a integração entre percepção prática dos agroflorestores e modelagem computacional avançada fortalece o planejamento produtivo, a sustentabilidade e a resiliência dos SAFs, posicionando o SAF3D como contribuição científica e tecnológica para a agroecologia e para a gestão de sistemas agroflorestais tropicais.

Palavras-chave: bioeconomia, sistemas agroflorestais, SAF3D.

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF AGROECOLOGICAL PRODUCTION SYSTEMS: DEVELOPMENT OF THE SAF3D ARTIFACT FOR PLANNING AND OPTIMIZATION OF PRODUCTIVE ARRANGEMENTS

ABSTRACT - This dissertation analyzes the role of digital technologies in the modeling, planning, and management of biodiverse Agroforestry Systems (AFS), articulating the perception of experienced agroforesters with the development of a computational artifact, SAF3D. Initially, it investigated how farmers perceived and incorporated digital tools into their production systems, identifying that such technologies are recognized as strategic instruments for spatial organization, successional planning, and productive monitoring, provided they complement accumulated empirical knowledge. Adoption occurs selectively and critically, being influenced by factors such as education level, prior experience, system complexity, and institutional support, as well as limitations related to rural infrastructure and integration with real-time field data. Based on this evidence, on a scientometric and bibliometric analysis of the scientific literature on the topic, and on the formal specification of functional and non-functional requirements and system actors, a UML model was developed, following Design Science Research principles and organized into a modular architecture, to represent vertical stratification and integrate productive and ecological components of AFS in a three-dimensional environment. The artifact demonstrated the capacity to integrate data from multiple sources (GIS, LiDAR, and DEM), simulate growth and agroecological succession scenarios, identify structural gaps, and optimize species consortia and management practices. Compared to two-dimensional approaches, it showed greater accuracy in estimating canopy area, aboveground biomass, and light distribution. Conceptual, structural, and functional validation supports their consistency and applicability as a decision-making support tool. It is concluded that the integration between agroforesters' practical perception and advanced computational modeling strengthens productive planning, sustainability, and the resilience of agroforestry systems, positioning SAF3D as a scientific and technological contribution to agroecology and the management of agroforestry systems.

Keywords: bioeconomy; agroforestry systems; SAF3D

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC+. Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária

APSIM. Agricultural Production Systems sIMulator

DEM. Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevação)

DSR. Design Science Research

DSRM. Design Science Research Methodology

DSS. Decision Support Systems (Sistemas de Apoio à Decisão)

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations

GIS. Geographic Information System (Sistema de Informações Geográficas)

IA. Inteligência Artificial

IoT. Internet of Things (Internet das Coisas)

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change

LiDAR. Light Detection and Ranging

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

NbS. Nature-based Solutions (Soluções Baseadas na Natureza)

ODS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU. Organização das Nações Unidas

PRISMA. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

SAF. Sistema Agroflorestal

SAFs. Sistemas Agroflorestais

SAF3D. Nome do artefato computacional tridimensional desenvolvido nesta dissertação

SEMADESC. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação (MS)

TLS. Terrestrial Laser Scanning

UML. Unified Modeling Language

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre modelos e plataformas computacionais aplicados a sistemas agroflorestais e à modelagem funcional-estrutural de plantas.....	32
Quadro 2 – Processo de seleção da amostra.....	41
Quadro 3 – Critérios de inclusão.....	41
Quadro 4 – Categorias analíticas definidas a priori com base no referencial teórico	42
Quadro 5 – Eixos temáticos e palavras-chave utilizadas.....	48
Quadro 6 – Estrutura da Modelagem UML.....	51
Quadro 7 – Relação entre os objetivos específicos e as etapas metodológicas.....	54
Quadro 8 – Aplicativos analisados na fase prévia do desenvolvimento do artefato SAF3D.....	57
Quadro 9 – Plataformas digitais de monitoramento e apoio para SAF.....	59
Quadro 10 – Artefatos mais relevantes concebidos a partir dos modelos pesquisados	60
Quadro 11 – Perfil dos agroflorestores, canais e abordagens das videoaulas analisadas.....	61
Quadro 12 – Categorias de percepção identificadas na análise.....	62
Quadro 13 – Comparação analítica entre agroflorestores quanto à estratificação, planejamento e uso de tecnologias digitais.....	63
Quadro 14 – Fatores que influenciam a adoção das tecnologias.....	64
Quadro 15 – Adaptação tecnológica.....	65
Quadro 16 – Procedimentos de validação.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da estratificação vertical de um Sistema Agroflorestal (SAF) e das principais variáveis consideradas na modelagem tridimensional do artefato SAF3D.....	31
Figura 2 – Fluxograma geral das etapas metodológicas da pesquisa.....	37
Figura 3 – Nuvem de palavras-chave utilizadas na busca da amostragem.....	40
Figura 4 – Processo linear do trabalho de manejo agroflorestal, com os atores envolvidos em cada etapa.....	43
Figura 5 – Fluxograma de Revisão Sistemática.....	50
Figura 6 – Mapa mental da jornada de pesquisa para a construção do SAF3D.....	56
Figura 7 – Classificação dos sistemas agroflorestais segundo Nair (1985).....	68
Figura 8 – Diagrama de modelagem conceitual do artefato SAF3D.....	72
Figura 9 – Diagrama de classes do SAF3D.....	73
Figura 10 – Diagrama de relacionamento da aplicação SAF3D com atores e casos de uso.....	74
Figura 11 – Diagrama de componentes das fases de criação do artefato SAF3D....	75
Figura 12 – Diagrama de atores e framework do artefato SAF3D.....	76
Figura 13 – Diagrama de componentes naturais e artificiais do framework do artefato SAF3D.....	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quantidade de artigos publicados entre 2019 e 2026.....	69
Gráfico 2 – Quantidade de publicações do periódico Agroforestry Systems, entre 2019 e 2026.....	69
Gráfico 3 – Quantidade de citações dos principais autores, entre 2019 e 2026.....	70

1. INTRODUÇÃO

Os desafios contemporâneos relacionados às mudanças climáticas, à perda de biodiversidade e à degradação dos recursos naturais configuram-se entre os principais problemas socioambientais do século XXI. O aumento da temperatura média global, as alterações nos regimes de precipitação e a intensificação de eventos climáticos extremos evidenciam os limites ecológicos dos atuais modelos de produção e consumo, exigindo respostas que conciliem produtividade agrícola, conservação ambiental e justiça social (IPCC, 2022).

De acordo com o relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022), aproximadamente 23% das emissões globais de gases de efeito estufa estão associadas ao setor AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use). O documento ressalta que a intensificação agrícola baseada em monoculturas, uso intensivo de insumos químicos e simplificação ecológica dos agroecossistemas contribui para a degradação ambiental e para a redução da resiliência produtiva frente às mudanças climáticas. Paralelamente, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura aponta que a perda acelerada de biodiversidade compromete processos ecológicos essenciais, como a ciclagem de nutrientes, a polinização e a regulação climática, colocando em risco a estabilidade dos sistemas alimentares globais (FAO, 2020).

Diante desse cenário, a busca por modelos produtivos mais sustentáveis passou a ocupar posição central nas agendas científica e política internacionais. A noção de agricultura sustentável, entendida como aquela capaz de atender às necessidades produtivas presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades, tornou-se referência para a formulação de políticas públicas e para a reorientação de sistemas de produção em todo o mundo. Contudo, a tradução desse princípio em práticas concretas de manejo permanece um desafio, sobretudo em regiões tropicais marcadas por elevada biodiversidade e por sistemas produtivos tradicionalmente pouco documentados cientificamente (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987)

Nesse contexto, os sistemas de produção agroecológica têm se consolidado como uma alternativa capaz de integrar produtividade, conservação ambiental e

desenvolvimento rural sustentável. Esses sistemas compreendem diferentes arranjos produtivos, como sistemas agroflorestais, sistemas silvipastoris, integração lavoura-pecuária-floresta, quintais produtivos e outras formas de manejo baseadas em princípios ecológicos. Sua principal característica é a promoção de interações biológicas capazes de aumentar a eficiência do uso dos recursos naturais, reduzir a dependência de insumos externos e fortalecer a resiliência dos agroecossistemas (FAO, 2018).

A agroecologia, enquanto campo científico, conjunto de práticas e movimento social, oferece o arcabouço conceitual que sustenta essa transição. Wezel *et al.* (2020), em ampla revisão sobre os princípios agroecológicos, sistematizam treze princípios, como reciclagem, diversidade, sinergia, eficiência e resiliência, que orientam a transição de sistemas agrícolas convencionais para sistemas mais diversificados e ecologicamente equilibrados. Segundo os autores, esses princípios, embora formulados de maneira geral, aplicam-se de forma localizada, gerando práticas agroecológicas diversas e adaptadas a diferentes contextos socioambientais.

Ao compreender os sistemas agrícolas como agroecossistemas complexos e dinâmicos, a agroecologia propõe estratégias capazes de fortalecer a resiliência ecológica e socioeconômica dos territórios rurais, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, em especial ao ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ao ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e ao ODS 15 (Vida Terrestre) (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015).

Entre esses diferentes arranjos produtivos agroecológicos, destacam-se os sistemas agroflorestais biodiversos (SAFs) como um dos exemplos mais representativos, caracterizados pela integração de espécies arbóreas, arbustivas, culturas agrícolas e, em determinados contextos, componentes pecuários em arranjos espaciais e temporais planejados (FAO, 2020). Esses sistemas estruturam-se a partir de princípios ecológicos como sucessão natural, estratificação vertical e diversidade funcional, buscando mimetizar processos observados em ecossistemas naturais (NAIR, 1993; PADOVAN *et al.*, 2021). Diferentemente dos sistemas agrícolas convencionais baseados em monoculturas e elevada dependência de insumos externos, os SAFs incorporam a complexidade ecológica como elemento

estruturante da produtividade e da sustentabilidade.

Contudo, essa mesma complexidade que confere aos sistemas agroecológicos sua resiliência ambiental também impõe desafios consideráveis ao seu planejamento. A elevada diversidade de espécies, a estratificação vertical da vegetação, a sucessão temporal das culturas e as múltiplas interações ecológicas tornam o planejamento desses sistemas significativamente mais complexo do que o observado em sistemas agrícolas convencionais. Essa complexidade dificulta a representação espacial dos componentes produtivos e limita a avaliação integrada de cenários de manejo, exigindo instrumentos de apoio à decisão capazes de lidar com múltiplas variáveis simultaneamente. (YOUNG, 1997).

O avanço das tecnologias digitais tem ampliado o uso de modelos computacionais para apoiar o planejamento agrícola. A digitalização da agricultura, que reúne sensores, robótica, inteligência artificial e análise de dados de larga escala, vem sendo apontada como um dos principais vetores de transformação do setor nas últimas duas décadas, com potencial de reduzir custos de produção, otimizar o uso de insumos e ampliar a eficiência ecológica e econômica das operações agrícolas, substituindo operações manuais por processos automatizados de coleta e análise de dados (TAGARAKIS *et al.*, 2024).

Entre essas tecnologias, a modelagem tridimensional destaca-se por possibilitar a representação espacial da arquitetura dos sistemas produtivos, permitindo analisar relações de vizinhança entre espécies, interceptação luminosa, ocupação dos estratos vegetais e diferentes configurações de arranjos produtivos. De forma complementar, tecnologias como os gêmeos digitais (digital twins) têm ganhado espaço na agricultura e na silvicultura como réplicas virtuais dinâmicas de sistemas produtivos reais, permitindo simular cenários de manejo antes de sua implementação em campo (TAGARAKIS *et al.*, 2024).

Embora existam ferramentas computacionais destinadas ao planejamento agrícola, observa-se uma carência de artefatos digitais capazes de representar, em ambiente tridimensional, a elevada complexidade estrutural dos sistemas de produção agroecológica, especialmente aqueles caracterizados por elevada biodiversidade e múltiplos componentes produtivos. Essa limitação restringe a análise integrada de cenários de planejamento, otimização e tomada de decisão, evidenciando uma lacuna científica e tecnológica que fundamenta a presente

investigação.

Entre as diversas práticas agroecológicas, os sistemas agroflorestais biodiversos (SAFs) ocupam posição de destaque na literatura internacional em razão de seu potencial de conciliar produção agrícola, conservação da biodiversidade e mitigação das mudanças climáticas. A diversidade biológica presente nesses arranjos favorece interações agroecológicas sinérgicas capazes de potencializar serviços ecossistêmicos essenciais, como sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes, conservação do solo, regulação microclimática e manutenção de polinizadores (AGOSTINHO *et al.*, 2021; EMBRAPA, 2018).

Em escala global, a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) reconhece a agrofloresta como estratégia central para restauração de paisagens degradadas e fortalecimento da resiliência dos sistemas produtivos (FAO, 2018; FAO, 2020). Estima-se que mais de um bilhão de hectares agrícolas no mundo apresentem algum nível de cobertura arbórea, evidenciando o potencial dessas práticas para mitigação das emissões de gases de efeito estufa e adaptação às mudanças climáticas (FAO, 2020).

No Brasil, país reconhecido por sua megadiversidade biológica e ampla extensão territorial, as condições edafoclimáticas favorecem a implementação e a expansão de sistemas agroflorestais. Instituições como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) têm desempenhado papel central na geração de conhecimento científico voltado à integração lavoura-pecuária-floresta e ao desenvolvimento de SAFs biodiversos (EMBRAPA, 2018).

No âmbito das políticas públicas, o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC+), lançado em 2021 pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, reforça a importância da adoção de tecnologias de baixa emissão de carbono e sistemas integrados de produção como estratégia nacional de mitigação das mudanças climáticas, estabelecendo metas de expansão de mais de 72 milhões de hectares sob práticas de baixo carbono até 2030 (MAPA, 2021).

O desenvolvimento científico dos sistemas agroflorestais possui bases institucionais consolidadas há décadas. Nesse contexto, destaca-se a criação do International Council for Research in Agroforestry (ICRAF), atualmente denominado World Agroforestry, que consolidou metodologias integradas voltadas à avaliação

agroecológica, produtiva e socioeconômica desses sistemas. Paralelamente, diversos autores contribuíram para a consolidação dos fundamentos teóricos da agrofloresta. Nair (1985) estabeleceu um dos primeiros sistemas de classificação dos arranjos agroflorestais, organizando-os segundo critérios estruturais, funcionais e socioeconômicos, classificação amplamente adotada até os dias atuais.

Sinclair (1999), por sua vez, propôs uma classificação geral das práticas agroflorestais fundamentada na unidade "prática" em vez de "sistema", permitindo maior flexibilidade na comparação entre diferentes arranjos observados em campo. Somarriba (1992) revisitou criticamente as definições até então propostas para o termo "agrofloresta", propondo critérios mínimos, a existência de ao menos duas espécies vegetais em interação biológica, sendo uma delas lenhosa perene e manejada para produção, que ainda hoje orientam a delimitação conceitual do campo.

No contexto latino-americano, pesquisadores como Beer (1987) e Somarriba desempenharam papel relevante na sistematização de metodologias para avaliação do sombreamento, do crescimento e das interações entre espécies em sistemas agroflorestais, especialmente em cultivos de café e cacau sombreados, um dos arranjos agroflorestais mais estudados mundialmente. Complementando essas abordagens, Young (1997), em obra de referência sobre o manejo do solo em sistemas agroflorestais, sistematizou evidências sobre o papel dessas práticas na conservação da fertilidade, no controle da erosão e na ciclagem de nutrientes.

Mais recentemente, estudos conduzidos por Tscharntke *et al.* (2012) integraram biodiversidade, serviços ecossistêmicos e segurança alimentar em uma perspectiva de paisagem, argumentando que a produção em pequena escala baseada em sistemas diversificados constitui a espinha dorsal da segurança alimentar global, em contraposição a abordagens que defendem a intensificação agrícola segregada da conservação ambiental ("land sparing").

Do ponto de vista tecnológico, o planejamento e a avaliação da estratificação vertical em SAFs têm se beneficiado de modelos ecofisiológicos avançados. Entre os principais exemplos internacionais destaca-se o modelo Hi-sAFe (Highly Spatial AgroForestry model), desenvolvido por Dupraz *et al.* (2019), que permite simular interações entre árvores e culturas agrícolas em escala tridimensional, considerando variáveis como interceptação luminosa, competição radicular e balanço hídrico.

Outro modelo amplamente utilizado é o Yield-SAFE, aplicado em diferentes países europeus para simular produtividade e fluxos de carbono em sistemas agroflorestais sob distintos cenários climáticos. Tais ferramentas possibilitam decisões de manejo mais precisas, integrando dados ecológicos, produtivos e socioeconômicos para otimizar a sustentabilidade dos SAFs tropicais.

As tecnologias digitais têm se mostrado cada vez mais fundamentais para o manejo e o monitoramento de SAFs, permitindo o planejamento espacial, a avaliação de produtividade e a análise de serviços ecossistêmicos. O sensoriamento remoto orbital e aéreo, associado a sistemas como o LiDAR (Light Detection and Ranging), possibilita a obtenção de dados tridimensionais precisos sobre a estrutura da vegetação, incluindo altura das árvores, densidade do dossel e distribuição dos estratos.

Kanmegne Tamga *et al.* (2022), em estudo conduzido em três regiões climáticas da África Ocidental, demonstraram a viabilidade de estimar a biomassa acima do solo em sistemas agroflorestais a partir da integração de dados Sentinel-1, Sentinel-2, ALOS e GEDI, este último um sistema orbital de perfilamento a laser (LiDAR espacial) dedicado à medição da estrutura vertical da vegetação, evidenciando o potencial dessas tecnologias para a quantificação de carbono e biomassa em sistemas agroflorestais tropicais.

De forma complementar, a criação de gêmeos digitais (digital twins) tem se expandido rapidamente na agricultura e na silvicultura desde 2022, conforme revisão sistemática de Tagarakis *et al.* (2024), que identificaram crescimento expressivo do número de publicações sobre o tema nos anos de 2022 e 2023, com aplicações voltadas tanto à agricultura de campo aberto quanto à silvicultura. Segundo os autores, um gêmeo digital consiste em uma representação virtual dinâmica de um sistema físico, alimentada por fluxos contínuos de dados, que permite simular cenários, antecipar respostas a mudanças ambientais e testar alternativas de manejo antes de sua implementação real, funcionalidade especialmente relevante para sistemas agroflorestais, cuja dinâmica sucessional se desenvolve ao longo de vários anos.

Apesar desses avanços, a literatura internacional aponta lacunas relevantes no desenvolvimento de aplicações especificamente direcionadas a sistemas agroflorestais tropicais biodiversos. A maioria dos modelos disponíveis, a exemplo

do Hi-sAFé e do Yield-SAFE, foi originalmente desenvolvida e calibrada para condições de clima temperado, com arranjos relativamente simples de poucas espécies, o que limita sua aplicabilidade direta a sistemas tropicais caracterizados por elevada diversidade funcional, estratificação vertical acentuada e sucessão ecológica acelerada (DUPRAZ *et al.*, 2019).

Ademais, observa-se uma carência de plataformas capazes de integrar, em um único ambiente tridimensional, variáveis ecológicas, produtivas e socioeconômicas, o que restringe a análise integrada de cenários de manejo e a comparabilidade entre estudos. Essa limitação reforça a necessidade de *frameworks* computacionais integradores, capazes de articular dados ecológicos, espaciais e socioeconômicos em arquitetura interoperável e escalável, adaptada às especificidades dos sistemas agroflorestais tropicais.

Diante dessa lacuna, propõe-se o desenvolvimento do artefato computacional SAF3D, concebido como um ambiente de modelagem tridimensional destinado ao planejamento e à otimização de sistemas de produção agroecológica. O artefato SAF3D tem como objetivo integrar variáveis agroecológicas, produtivas e socioeconômicas em um ambiente de simulação espacial, possibilitando a representação de arranjos produtivos complexos e a análise de diferentes cenários relacionados à produtividade, ao sequestro de carbono e à viabilidade econômica dos sistemas.

Ao permitir a visualização e a simulação tridimensional das interações entre espécies vegetais e componentes do sistema produtivo, o artefato SAF3D busca ampliar a compreensão das dinâmicas ecológicas presentes nos sistemas agroflorestais e subsidiar processos de planejamento mais eficientes e sustentáveis. Sua concepção segue os princípios da Design Science Research (DSR), abordagem metodológica orientada à criação de artefatos, sejam eles constructos, modelos, métodos ou instanciações, capazes de resolver problemas relevantes identificados na prática, ao mesmo tempo em que contribuem para o avanço do conhecimento científico sobre o fenômeno estudado (HEVNER *et al.*, 2004).

Nesse sentido, a presente pesquisa apresenta caráter inovador ao propor o desenvolvimento do artefato SAF3D, adaptado às especificidades dos sistemas agroflorestais tropicais, contribuindo para o avanço científico da agroecologia aplicada e para o fortalecimento de estratégias de produção agrícola sustentáveis

em diferentes contextos territoriais. Além disso, busca-se preencher uma lacuna existente no campo da modelagem agroecológica, uma vez que grande parte dos artefatos disponíveis foi desenvolvida para sistemas agrícolas simplificados ou para condições temperadas, apresentando limitações quando aplicada a sistemas agroflorestais biodiversos em regiões tropicais.

Diante desse cenário, emerge a seguinte questão de pesquisa: como a modelagem tridimensional pode contribuir para o planejamento e a otimização de sistemas de produção agroecológica por meio do desenvolvimento de um artefato computacional capaz de representar espacialmente diferentes arranjos produtivos e integrar variáveis ecológicas, produtivas e socioeconômicas?

A partir dessa problemática, o desenvolvimento do artefato SAF3D busca oferecer uma abordagem inovadora para o planejamento de sistemas agroecológicos, possibilitando simulações espaciais mais precisas, avaliação de cenários produtivos e suporte técnico para agricultores, pesquisadores e formuladores de políticas públicas voltadas ao uso sustentável da terra.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um artefato computacional tridimensional SAF3D para apoiar o planejamento e a otimização de sistemas de produção agroecológica, integrando variáveis agroecológicas, produtivas e socioeconômicas em um ambiente de modelagem espacial.

1.1.2 Objetivos Específicos

I. Analisar a literatura e a percepção dos usuários sobre tecnologias digitais aplicadas ao planejamento de sistemas de produção agroecológica, utilizando os sistemas agroflorestais biodiversos como principal contexto de aplicação.

II. Elaborar a modelagem UML do artefato SAF3D para representar tridimensionalmente diferentes arranjos produtivos agroecológicos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este estudo justifica-se pela necessidade de desenvolver artefatos digitais inovadores que apoiem o planejamento e a gestão de sistemas agroflorestais biodiversos, integrando produção agrícola, conservação ambiental e sustentabilidade socioeconômica. A modelagem tridimensional permite visualizar interações entre espécies, analisar competição por luz e recursos e avaliar diferentes cenários de manejo, fortalecendo a tomada de decisão técnica.

A integração do artefato SAF3D com tecnologias digitais emergentes, como sensoriamento remoto, drones, sistemas de informação geográfica e inteligência artificial, amplia o suporte ao planejamento agroecológico em diferentes escalas, desde propriedades familiares até o planejamento territorial. O artefato SAF3D contribui para reduzir barreiras técnicas à adoção de SAFs, otimizar produtividade, fortalecer políticas públicas de restauração ecológica e mitigação das mudanças climáticas, alinhando-se às recomendações internacionais sobre soluções baseadas na natureza e inovação tecnológica (FAO, 2018; IPCC, 2022).

Do ponto de vista metodológico, este estudo também contribui para o avanço do conhecimento em áreas como modelagem computacional, representação espacial tridimensional, Engenharia de Software, Agricultura Digital e Sistemas de Apoio à Decisão, reforçando o caráter interdisciplinar da pesquisa e sua relevância para o desenvolvimento de artefatos digitais aplicados à agroecologia.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em cinco capítulos principais. O Capítulo 1 apresenta a introdução, contextualizando o tema, a problemática, os objetivos e a justificativa do estudo. O Capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, abordando os fundamentos teóricos sobre agroecologia, sistemas agroflorestais biodiversos e modelagem de sistemas produtivos. O Capítulo 3 descreve a metodologia, detalhando o desenvolvimento do SAF3D, as variáveis consideradas, os procedimentos de coleta e análise de dados, bem como os critérios de validação do modelo. O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões, analisando os achados

à luz da literatura existente e das hipóteses levantadas. O Capítulo 5 traz as considerações finais, destacando as contribuições científicas, limitações do estudo e recomendações para pesquisas futuras. Por fim, reúnem-se as referências bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi estruturada em seis eixos complementares, organizados de modo a conduzir o leitor da contextualização socioambiental mais ampla até a lacuna científica que fundamenta o desenvolvimento do artefato SAF3D: (1) os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e a Agricultura Digital como instrumento de sua concretização; (2) os Sistemas Agroflorestais (SAFs) e a complexidade estrutural que justifica sua modelagem computacional; (3) políticas públicas de incentivo, com destaque para o Programa Agroflorestar MS; (4) Agricultura Digital e tecnologias emergentes de monitoramento e representação; (5) modelagem computacional aplicada a sistemas agroecológicos, incluindo o desenvolvimento de artefatos digitais sob a ótica da Engenharia de Software; e (6) planejamento e otimização de arranjos produtivos por meio de Sistemas de Apoio à Decisão. Ao final, apresenta-se uma síntese integradora que articula essas frentes teóricas e delimita a lacuna científica investigada.

2.1 OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E AGRICULTURA DIGITAL

A Agenda 2030, proposta pela Organização das Nações Unidas em 2015, estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas que orientam políticas globais voltadas à construção de sociedades mais justas, resilientes e ambientalmente sustentáveis. Entre esses objetivos, destacam-se o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e o ODS 15 (Vida Terrestre), que incentivam sistemas produtivos capazes de integrar segurança alimentar, inovação tecnológica, mitigação das mudanças climáticas e conservação da biodiversidade (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015).

A literatura recente reconhece a Agricultura Digital como um dos principais vetores para o alcance desses objetivos. Tecnologias como sensoriamento remoto, Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial e sistemas de apoio à decisão ampliam a capacidade de monitorar, prever e otimizar processos produtivos, reduzindo o uso de insumos, mitigando impactos ambientais e fortalecendo a

resiliência climática dos sistemas agrícolas, contribuindo, diretamente para as metas de agricultura sustentável, inovação e ação climática estabelecidas na Agenda 2030 (IPCC, 2022). Nesse sentido, a transição entre a agenda de sustentabilidade global e a incorporação de tecnologias digitais no planejamento agrícola não constitui um desvio temático, mas uma continuidade lógica: a digitalização é, ela própria, um instrumento de política climática e de desenvolvimento sustentável, e não apenas um recurso operacional acessório.

Nesse contexto, os sistemas agroflorestais biodiversos (SAFs) representam uma estratégia eficaz para alcançar esses objetivos, uma vez que integram diferentes espécies vegetais e práticas de manejo sustentável no mesmo espaço produtivo, ao mesmo tempo em que se beneficiam da incorporação de tecnologias digitais para seu planejamento e monitoramento (AGOSTINHO *et al.*, 2021).

2.2 SISTEMAS AGROFLORESTAIS: COMPLEXIDADE ESTRUTURAL E DEMANDA POR MODELAGEM

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) constituem arranjos produtivos que combinam árvores, cultivos agrícolas e, em alguns casos, componentes pecuários, estruturando-se a partir de princípios ecológicos como sucessão natural, estratificação vertical e diversidade funcional (NAIR, 1993). Diferentemente da abordagem histórica e conceitual, consolidada por autores como Nair (1985), Sinclair (1999) e Somarriba (1992), que sistematizaram classificações estruturais, funcionais e definicionais dos arranjos agroflorestais, o que interessa mais diretamente a esta pesquisa é a natureza estrutural desses sistemas enquanto objeto de modelagem.

Essa natureza é marcada por elevada complexidade. A diversidade de espécies com diferentes portes e ciclos de vida, a estratificação vertical da vegetação, que organiza os componentes em camadas desde o dossel emergente até o estrato herbáceo, a sucessão ecológica ao longo do tempo e as múltiplas interações espaciais entre plantas de diferentes estratos tornam o planejamento de um SAF substancialmente mais complexo do que o de um sistema agrícola convencional de monocultura (YOUNG, 1997). Cada um desses componentes interage simultaneamente com fatores como interceptação luminosa, competição radicular e ciclagem de nutrientes, de modo que decisões de manejo tomadas

isoladamente, como a escolha de uma espécie ou o espaçamento de plantio, produzem efeitos sistêmicos difíceis de antecipar apenas com base na experiência de campo (BEER, 1987).

É justamente essa complexidade multidimensional, e não a riqueza histórica do tema em si, que fundamenta a necessidade de instrumentos computacionais de apoio ao planejamento. Tschardtke *et al.* (2012), ao discutir a integração entre biodiversidade e segurança alimentar em paisagens agrícolas, argumentam que sistemas diversificados em pequena escala demandam abordagens de análise capazes de lidar com múltiplas variáveis interdependentes, exigência que a modelagem tridimensional está particularmente habilitada a atender, ao representar espacialmente essas interações em vez de tratá-las de forma agregada ou bidimensional.

2.3 POLÍTICAS PÚBLICAS DE INCENTIVO E O PROGRAMA AGROFLORESTAR MS

As políticas públicas de incentivo ambiental desempenham papel estratégico na transição de modelos produtivos convencionais para sistemas sustentáveis. Em Mato Grosso do Sul, o Programa Estadual de Mudanças Climáticas (PROCLIMA) e o Programa Agroflorestar MS (Carbono Neutro) articulam-se com o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC+), lançado em 2021 pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que estabelece metas de expansão de práticas de baixo carbono em mais de 72 milhões de hectares até 2030 (MAPA, 2021).

O Agroflorestar MS, especificamente, direciona-se à inclusão da agricultura familiar sul-mato-grossense no mercado voluntário de carbono por meio da implementação de SAFs, com metas de 2.000 hectares distribuídos nos biomas Cerrado, Pantanal e Mata Atlântica (SEMADESC, 2023). Essas iniciativas evidenciam a relevância prática e territorial da pesquisa: à medida que a adoção de SAFs se expande como política pública, cresce proporcionalmente a demanda por ferramentas capazes de apoiar tecnicamente seu planejamento, monitoramento e otimização, o que reforça, também sob a ótica da política pública, a pertinência do desenvolvimento do artefato SAF3D.

2.4 AGRICULTURA DIGITAL E TECNOLOGIAS EMERGENTES DE MONITORAMENTO E REPRESENTAÇÃO

A Agricultura Digital, ou Agricultura 4.0, reúne um conjunto de tecnologias que vem transformando substancialmente o planejamento e a gestão de sistemas agrícolas e florestais. Entre seus principais componentes está a Internet das Coisas (IoT), que conecta sensores, atuadores e dispositivos de campo em redes capazes de coletar e transmitir dados ambientais e produtivos em tempo real, ampliando a capacidade de monitoramento contínuo de variáveis como umidade do solo, temperatura e crescimento vegetativo.

O sensoriamento remoto orbital e aéreo, associado a sistemas de Detecção e Alcance por Luz - LiDAR (*Light Detection and Ranging*), possibilita a obtenção de dados tridimensionais precisos sobre a estrutura da vegetação, incluindo altura das árvores, densidade do dossel e distribuição vertical dos estratos. Kanmegne Tamga *et al.* (2022), em estudo conduzido em três regiões climáticas da África Ocidental, demonstraram a viabilidade de estimar a biomassa acima do solo em sistemas agroflorestais a partir da integração de dados Sentinel-1, Sentinel-2, ALOS e GEDI, este último um sistema orbital de perfilamento a laser dedicado à medição da estrutura vertical da vegetação, evidenciando o potencial dessas tecnologias para a quantificação de carbono e biomassa em sistemas agroflorestais tropicais. Complementarmente, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permitem organizar, sobrepor e analisar espacialmente essas informações, subsidiando decisões relacionadas ao zoneamento e à alocação de arranjos produtivos.

A Inteligência Artificial e o aprendizado de máquina, por sua vez, ampliam a capacidade de identificar padrões em grandes volumes de dados, o chamado Big Data agrícola, permitindo prever produtividade, diagnosticar estresse hídrico e mapear a distribuição de espécies com maior precisão do que os métodos tradicionais de amostragem. De forma complementar, a criação de gêmeos digitais (*digital twins*) tem se expandido rapidamente na agricultura e na silvicultura desde 2022, conforme revisão sistemática de Tagarakis *et al.* (2024), que identificaram crescimento expressivo do número de publicações sobre o tema nos anos de 2022 e 2023. Um gêmeo digital consiste em uma representação virtual dinâmica de um

sistema físico, alimentada por fluxos contínuos de dados, que permite simular cenários, antecipar respostas a mudanças ambientais e testar alternativas de manejo antes de sua implementação real, funcionalidade especialmente relevante para sistemas agroflorestais, cuja dinâmica sucessional se desenvolve ao longo de vários anos.

Essas tecnologias, tomadas isoladamente, resolvem problemas específicos de monitoramento ou previsão; contudo, sua integração em um único ambiente tridimensional de simulação, capaz de articular dados espaciais, ecológicos e produtivos de forma simultânea, permanece pouco explorada especificamente para sistemas agroflorestais tropicais biodiversos, o que remete diretamente à discussão sobre modelagem computacional desenvolvida a seguir.

2.5 MODELAGEM COMPUTACIONAL APLICADA A SISTEMAS AGROECOLÓGICOS

O planejamento e a avaliação de sistemas agroflorestais têm se beneficiado, nas últimas décadas, de modelos computacionais voltados à simulação de suas interações ecológicas e produtivas. Entre os principais exemplos internacionais destaca-se o modelo Hi-sAFe (*Highly Spatial AgroForestry model*), desenvolvido por Dupraz *et al.* (2019), que permite simular interações entre árvores e culturas agrícolas em escala tridimensional, considerando variáveis como interceptação luminosa, competição radicular e balanço hídrico. A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, a estratificação vertical característica de um SAF e as principais variáveis consideradas nessa modelagem tridimensional.

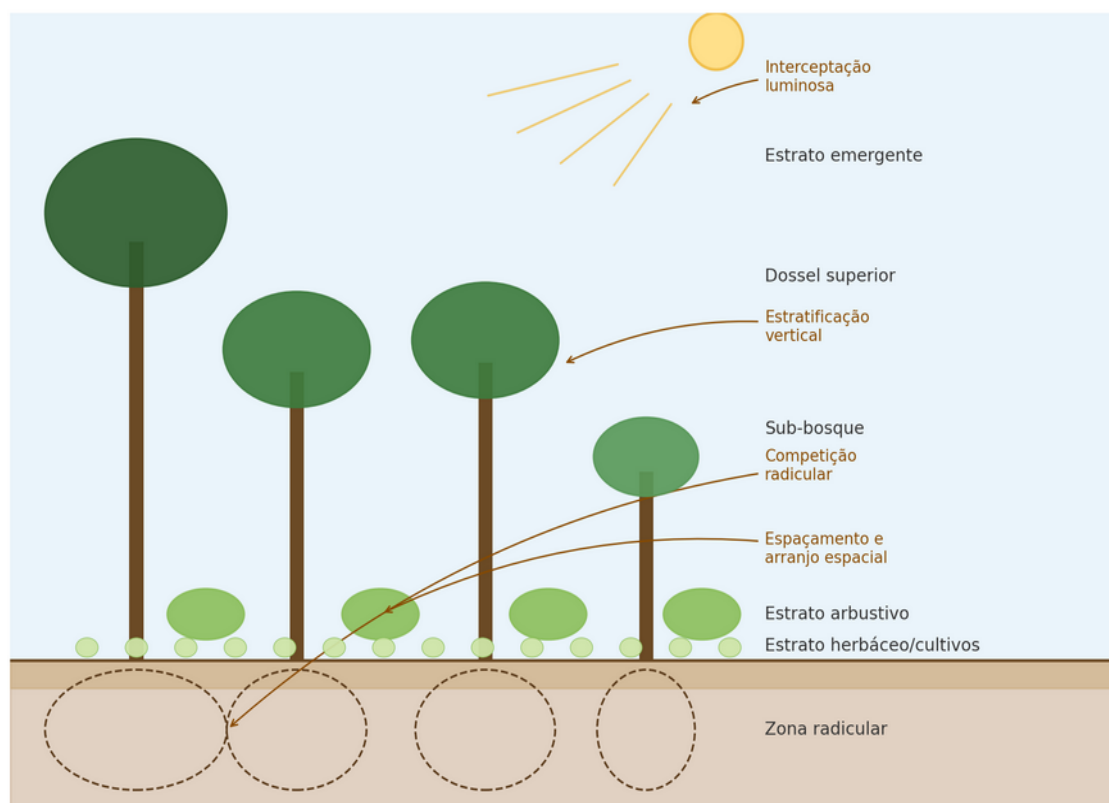


Figura 1. Representação esquemática da estratificação vertical de um Sistema Agroflorestal (SAF) e das principais variáveis consideradas na modelagem tridimensional do artefato SAF3D.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

A representação tridimensional (Figura 1) de um SAF precisa considerar simultaneamente múltiplos estratos vegetais, desde o dossel emergente até a zona radicular, além de variáveis como intercepção luminosa, competição radicular e arranjo espacial entre indivíduos. É exatamente essa multiplicidade de fatores interdependentes que os modelos computacionais apresentados a seguir buscam representar, cada qual com ênfases e limitações distintas.

O Yield-SAFE, por sua vez, é amplamente utilizado em países europeus para simular produtividade e fluxos de carbono em sistemas agroflorestais sob diferentes cenários climáticos. O WaNuLCAS (*Water, Nutrient and Light Capture in Agroforestry Systems*), desenvolvido por Van Noordwijk e Lusiana (1999), simula a captura de água, nitrogênio e luz em diferentes arranjos agroflorestais, com aplicação validada em sistemas de cultivo em faixas (*hedgerow intercropping*) e mosaicos de pousio-cultivo.

No campo da modelagem funcional-estrutural de plantas, plataformas como o OpenAlea, desenvolvido por Pradal *et al.* (2008), e o GroIMP, baseado no formalismo das gramáticas de crescimento relacional (*relational growth grammars*), permitem representar tridimensionalmente a arquitetura de plantas individuais e simular processos de crescimento, ramificação e resposta à luz a partir de estruturas de dados espaciais e algoritmos de computação gráfica. Embora desenvolvidas originalmente para a modelagem de plantas isoladas ou culturas agrícolas simples, essas plataformas fornecem fundamentos metodológicos relevantes, como o uso de estruturas topológicas multiescala e de motores de renderização tridimensional, para a representação computacional de sistemas vegetais mais complexos, a exemplo dos SAFs.

De forma complementar, modelos de simulação agrícola de propósito mais amplo, como o APSIM (*Agricultural Production Systems sIMulator*), desenvolvido por Holzworth *et al.* (2014), demonstram a viabilidade de arquiteturas modulares capazes de integrar múltiplos submodelos, solo, clima, cultura e manejo, em uma mesma plataforma de simulação, princípio arquitetural igualmente relevante para a concepção do SAF3D (Quadro 1).

Quadro 1. Comparação entre modelos e plataformas computacionais aplicados a sistemas agroflorestais e à modelagem funcional-estrutural de plantas.

Modelo/ Plataforma	Dimensio nalidade	Foco Principal	Aplicação em SAFs Tropicais Biodiversos
Hi-sAFe	Tridimensional	Interações árvore-cultura: luz, água, competição radicular	Limitada — calibrado para condições de clima temperado
Yield-SAFE	Bidimensional / estatístico	Produtividade e fluxos de carbono em SAFs europeus	Limitada — poucas espécies, contexto europeu
WaNuLCAS	Bidimensional	Captura de água, nutrientes e luz em arranjos agroflorestais	Limitada — arranjos relativamente simples
OpenAlea	Tridimensional	Arquitetura funcional-estrutural de plantas individuais	Não específica para SAFs
GroIMP	Tridimensional	Crescimento e ramificação via gramáticas de crescimento relacional	Não específica para SAFs
APSIM	Modular (não espacial 3D)	Simulação integrada solo-clima-cultura-manejo	Não específica para SAFs tropicais biodiversos

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

O Quadro 1, sistematiza os principais modelos e plataformas computacionais identificados na literatura, comparando suas características quanto à dimensionalidade da representação, à escala de aplicação e à adequação a sistemas agroflorestais tropicais biodiversos.

Observa-se, a partir dessa comparação, que os modelos voltados especificamente à agrofloresta (Hi-sAFe, Yield-SAFE, WaNuLCAS) foram desenvolvidos e calibrados majoritariamente para condições de clima temperado, com arranjos relativamente simples de poucas espécies, ao passo que as plataformas de modelagem funcional-estrutural (OpenAlea, GroIMP) e os simuladores agrícolas de propósito geral (APSIM), embora tecnicamente robustos, não foram concebidos para representar a estratificação vertical e a diversidade funcional características dos SAFs tropicais biodiversos. Essa lacuna de integração, entre a precisão ecofisiológica dos modelos agroflorestais, a sofisticação gráfica das plataformas de modelagem de plantas e a flexibilidade arquitetural dos simuladores agrícolas modulares, constitui uma das justificativas centrais para o desenvolvimento de um novo artefato computacional voltado especificamente aos SAFs tropicais.

2.6 DESENVOLVIMENTO DE ARTEFATOS COMPUTACIONAIS: ENGENHARIA DE SOFTWARE E DESIGN SCIENCE RESEARCH

Se a modelagem computacional fornece o conteúdo técnico-científico do SAF3D, é a Engenharia de Software que fornece o processo pelo qual esse conteúdo é transformado em um artefato funcional. A Design Science Research (DSR) constitui o paradigma metodológico adotado para orientar esse processo. Segundo Hevner *et al.* (2004), a pesquisa em Sistemas de Informação é caracterizada por dois paradigmas complementares: o paradigma comportamental, voltado a desenvolver e verificar teorias que expliquem ou prevejam fenômenos humanos e organizacionais, e o paradigma de design, voltado a ampliar as capacidades humanas e organizacionais por meio da criação de artefatos novos e inovadores. Nesse segundo paradigma, o conhecimento científico é produzido não apenas pela observação de um fenômeno, mas pela própria construção e avaliação do artefato que o representa ou que nele intervém.

A aplicação da DSR ao desenvolvimento do SAF3D envolve etapas como a

definição do problema a partir de evidências empíricas e lacunas teóricas, a especificação dos requisitos e objetivos do artefato, a concepção e o desenvolvimento propriamente ditos, a demonstração de sua aplicabilidade, a avaliação de seu desempenho e, por fim, a comunicação dos resultados à comunidade científica, ciclo iterativo que assegura tanto rigor teórico quanto relevância prática ao artefato produzido. Nesse processo, a arquitetura de software, isto é, a organização lógica dos componentes do sistema, suas responsabilidades e suas interações, e a prototipagem incremental desempenham papel central, permitindo testar e refinar progressivamente as funcionalidades do artefato antes de sua implementação completa (HEVNER *et al.*, 2004; PEFFERS *et al.*, 2007).

A modelagem em UML (*Unified Modeling Language*) constitui, nesse contexto, a principal ferramenta de representação formal da arquitetura do SAF3D, permitindo estruturar, por meio de diagramas de classes, casos de uso, atividades e componentes, tanto a organização estática do sistema, suas entidades, atributos e relacionamentos, quanto sua dinâmica de funcionamento, os fluxos de interação entre usuários, módulos e dados. A validação do artefato, por fim, segue abordagens multimétodos que combinam a comparação conceitual com modelos internacionais, a revisão da consistência estrutural dos diagramas produzidos e a simulação de cenários hipotéticos de uso, garantindo que o artefato desenvolvido atenda simultaneamente a critérios de rigor técnico e de relevância para seus usuários finais (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 1999).

2.7 PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE ARRANJOS PRODUTIVOS

Para além da representação visual e estrutural dos sistemas agroflorestais, o SAF3D propõe-se também a apoiar decisões relacionadas ao planejamento espacial e à otimização de arranjos produtivos, dimensão que demanda fundamentação teórica própria, distinta da modelagem descritiva discutida anteriormente. Os Sistemas de Apoio à Decisão (*Decision Support Systems* – DSS) constituem a categoria mais ampla de ferramentas computacionais voltadas a auxiliar tomadores de decisão diante de problemas complexos e multidimensionais, integrando dados, modelos analíticos e interfaces de interação capazes de subsidiar escolhas mais informadas (KAIM; CORD; VOLK, 2018).

No contexto do planejamento do uso da terra, a otimização espacial frequentemente assume caráter multicritério, uma vez que decisões sobre a alocação de espécies, arranjos e práticas de manejo envolvem objetivos simultâneos e por vezes conflitantes, como maximizar a produtividade, minimizar riscos ambientais e atender a restrições de viabilidade econômica. Kaim, Cord e Volk (2018), em revisão sobre técnicas de otimização multicritério aplicadas à alocação de uso da terra na agricultura, identificam abordagens que vão de métodos de escalarização, mais adequados à integração a priori de preferências de diferentes atores, a algoritmos evolutivos baseados em fronteiras de Pareto, mais indicados para a análise de soluções de compromisso entre objetivos conflitantes. Os autores destacam ainda que a escolha do método de otimização mais adequado depende diretamente das características do problema e do grau de participação dos diferentes atores envolvidos, agricultores, técnicos, formuladores de políticas, no processo decisório.

A incorporação desses princípios de apoio à decisão e otimização multicritério ao SAF3D permite que o artefato ultrapasse a função de mera visualização tridimensional, posicionando-se como uma ferramenta efetivamente capaz de subsidiar decisões de planejamento, manejo e organização espacial dos arranjos produtivos, o que dialoga diretamente com os termos "planejamento" e "otimização" presentes no título desta dissertação.

2.8 SÍNTESE INTEGRADORA E LACUNA CIENTÍFICA

A literatura analisada evidencia avanços consistentes em três frentes: (1) a consolidação conceitual da agroecologia e dos sistemas agroflorestais como estratégias de produção sustentável alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável; (2) a rápida expansão de tecnologias de Agricultura Digital, sensoriamento remoto, LiDAR, Inteligência Artificial e gêmeos digitais, como instrumentos de monitoramento e previsão; e (3) o desenvolvimento de modelos computacionais e plataformas de modelagem funcional-estrutural voltados à representação de sistemas vegetais e agrícolas.

Contudo, essas três frentes permanecem, em grande medida, fragmentadas entre si. Os modelos agroflorestais consolidados (Hi-sAFé, Yield-SAFE, WaNuLCAS)

oferecem precisão ecofisiológica, mas foram calibrados para condições temperadas e arranjos de baixa diversidade; as plataformas de modelagem de plantas (OpenAlea, GroIMP) oferecem sofisticação gráfica tridimensional, mas não incorporam a lógica agroecológica da estratificação vertical e da sucessão em sistemas biodiversos; e os simuladores agrícolas modulares (APSIM) oferecem flexibilidade arquitetural, mas carecem de representação espacial explícita. Paralelamente, as tecnologias de Agricultura Digital produzem dados cada vez mais precisos sobre a estrutura e a dinâmica dos SAFs, mas raramente estão integradas a ambientes de simulação tridimensional capazes de traduzir esses dados em cenários de planejamento e otimização.

Essa lacuna, a ausência de um artefato computacional que integre, em um único ambiente tridimensional, a precisão ecológica dos modelos agroflorestais, a sofisticação de representação espacial das plataformas de modelagem funcional-estrutural, a flexibilidade arquitetural dos simuladores agrícolas modulares e os dados providos pelas tecnologias de Agricultura Digital, ainda subsidiando decisões de planejamento e otimização por meio de princípios de Sistemas de Apoio à Decisão, constitui a principal lacuna científica identificada nesta revisão. É essa lacuna que fundamenta e justifica, de forma direta, o desenvolvimento do artefato computacional SAF3D, cuja metodologia de concepção é apresentada no Capítulo 3.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos nesta dissertação, a pesquisa foi estruturada em sete etapas metodológicas articuladas e sequenciais, desde a revisão da literatura até a validação final do artefato SAF3D. A Figura 2 sintetiza, de forma esquemática, esse percurso metodológico completo, que é detalhado ao longo das seções seguintes.

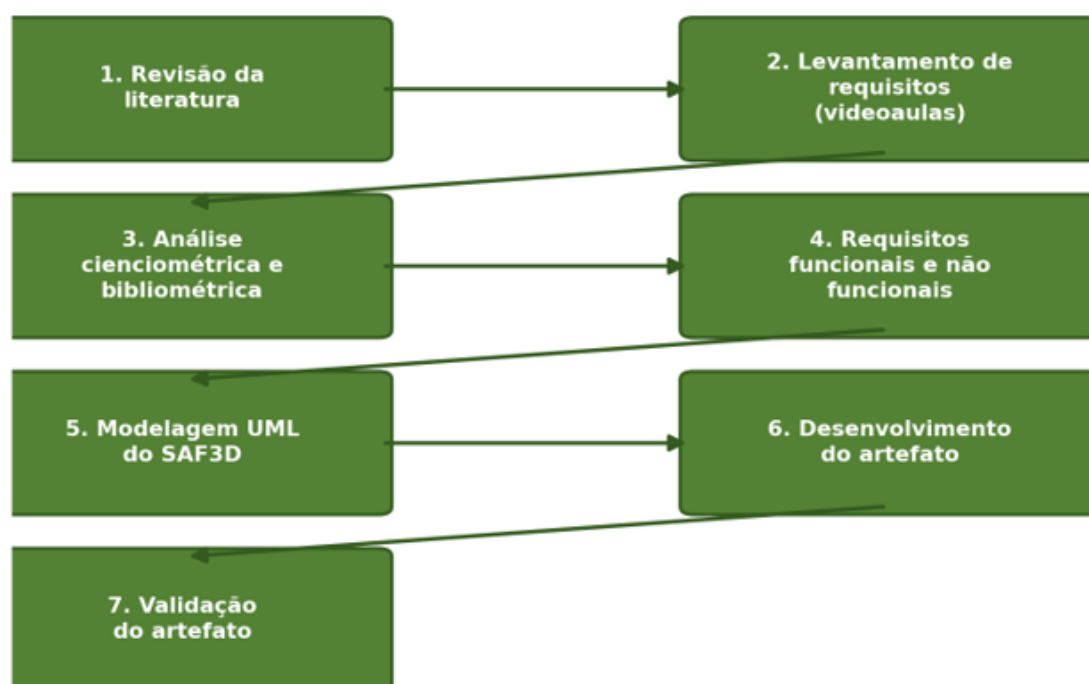


Figura 2. Fluxograma geral das etapas metodológicas da pesquisa.

Fonte: elaboração própria.

Como ilustrado na Figura 2, o processo de pesquisa parte da revisão da literatura (etapa 1) e do levantamento de requisitos junto a agroflorestores por meio da análise de videoaulas (etapa 2), avança para a análise cienciométrica e bibliométrica (etapa 3) e para a especificação formal de requisitos funcionais e não funcionais (etapa 4), culminando na modelagem UML (etapa 5), no desenvolvimento propriamente dito (etapa 6) e na validação do artefato (etapa 7). Essa sequência garante que cada decisão de modelagem esteja ancorada tanto em evidências empíricas quanto em fundamentação teórica consolidada, conforme detalhado a seguir.

3.1 DELINEAMENTO METODOLÓGICO GERAL DA PESQUISA

A presente pesquisa caracteriza-se, quanto à natureza, como aplicada, uma vez que tem como propósito gerar conhecimento de aplicação prática direcionado à solução de um problema específico, a carência de artefatos computacionais capazes de representar tridimensionalmente sistemas agroflorestais biodiversos, resultando no desenvolvimento do artefato SAF3D. Quanto aos objetivos, a pesquisa é exploratória e descritiva: exploratória por investigar uma lacuna tecnológica ainda pouco sistematizada na literatura, e descritiva por caracterizar formalmente, por meio da modelagem UML, a estrutura conceitual, funcional e arquitetural do sistema proposto (GIL, 2019).

Quanto à abordagem, adota-se um método misto (*mixed methods*), que combina técnicas qualitativas e quantitativas de forma complementar e sequencial (GIL, 2019). A dimensão qualitativa está presente na análise de conteúdo das videoaulas de agroflorestores experientes, utilizada como técnica de eliciação de requisitos, e na análise qualitativa de modelos conceituais, softwares e frameworks existentes na literatura. A dimensão quantitativa manifesta-se na análise cienciométrica e bibliométrica da produção científica sobre o tema, empregada para identificar tendências, lacunas e parâmetros técnicos que fundamentam as decisões de modelagem. Essas duas frentes convergem, por fim, para o desenvolvimento estruturado do artefato computacional propriamente dito, por meio da modelagem em UML (*Unified Modeling Language*).

A combinação entre pesquisa qualitativa e desenvolvimento de software justifica-se pela própria natureza do objeto de estudo: um artefato digital que precisa, simultaneamente, (1) responder a necessidades reais de usuários, agroflorestores, técnicos e pesquisadores, identificadas por meio de investigação qualitativa, e (2) ser tecnicamente viável e cientificamente fundamentado, o que demanda rigor metodológico próprio da Engenharia de Software.

Autores como Hevner *et al.* (2004) e Peffers *et al.* (2007) argumentam que a pesquisa em desenvolvimento de artefatos (*Design Science Research*) não prescinde da compreensão do problema em seu contexto humano e organizacional; ao contrário, a eliciação de requisitos a partir de fontes qualitativas constitui etapa fundamental para assegurar a relevância prática do artefato produzido. Dessa forma,

a estratégia metodológica adotada nesta dissertação integra, de modo articulado, quatro grandes frentes: (1) elicitação de requisitos por meio de análise qualitativa de conteúdo; (2) fundamentação teórico-técnica por meio de cienciometria e bibliometria; (3) especificação formal de requisitos e modelagem UML; e (4) desenvolvimento e validação do artefato SAF3D, conforme detalhado nas seções seguintes.

3.2 ANÁLISE DA PERCEPÇÃO DE AGROFLORESTORES SOBRE TECNOLOGIAS DIGITAIS EM SAFS

3.2.1 Delineamento do estudo

Este estudo teve como objetivo compreender a percepção de agroflorestores acerca do uso de tecnologias digitais na modelagem, planejamento e gestão de Sistemas Agroflorestais (SAFs) biodiversos, no período de agosto de 2023 a fevereiro de 2025. A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, exploratória e descritiva, utilizando análise de conteúdo de videoaulas produzidas por agroflorestores experientes como fonte empírica.

Cabe destacar que essa etapa não se limitou a uma análise qualitativa genérica: ela foi conduzida como técnica de elicitação de requisitos, procedimento característico das fases iniciais da Engenharia de Software (SOMMERVILLE, 2015). A análise qualitativa das videoaulas permitiu identificar necessidades dos usuários, funcionalidades desejadas, limitações dos sistemas atualmente utilizados no manejo de SAFs e requisitos preliminares para o desenvolvimento do artefato SAF3D, conforme detalhado na Seção 3.3. Dessa forma, essa etapa não apenas caracteriza a percepção dos agroflorestores, mas alimenta diretamente a especificação técnica do artefato desenvolvido.

Ressalta-se que, por se tratar de uma análise de conteúdos digitais disponíveis publicamente, não foi adotada a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), geralmente empregada em revisões sistemáticas (Moher *et al.*, 2009). A escolha por conteúdos audiovisuais justifica-se pela crescente relevância das plataformas digitais como espaços de

difusão de conhecimento técnico, intercâmbio de experiências e formação continuada em agrofloresta (FAO; CIRAD, 2021; Andrade; Ferraz Almeida, 2022).

3.2.2 Seleção da amostra

Devido à dificuldade de acesso direto a agroflorestores reconhecidos, a amostragem foi construída a partir de conteúdos públicos disponíveis em plataformas digitais, utilizando método Snowball adaptado ao ambiente digital (Goodman, 1961). Buscas iniciais foram realizadas com palavras-chave como "agrofloresta", "sistemas agroflorestais biodiversos", "manejo agroflorestal", "agrofloresta 3D" e "planejamento de SAF". A principal plataforma utilizada foi o YouTube, complementada por Instagram, Facebook, Moodle e Hotmart, visando ampliar o escopo e identificar conteúdos correlatos referenciados pelos produtores (Figura 3).

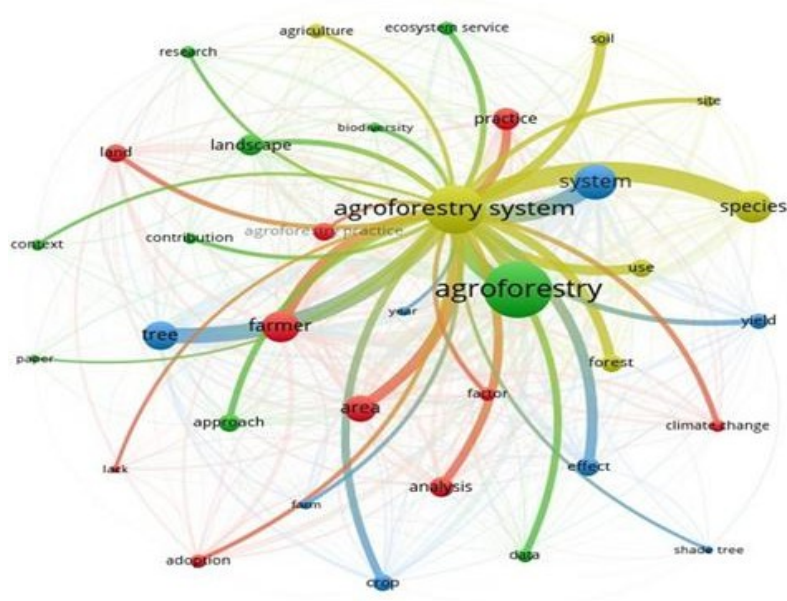


Figura 3. Nuvem de palavras-chave utilizadas na busca da amostragem.

Fonte: elaboração própria, através do software VosViewer (2026).

A partir dos primeiros resultados, foram identificados agroflorestores de referência, como Ernst Götsch, Fernando Rebello e Fabiana Peneireiro, que funcionaram como nós centrais da rede digital. A análise inicial contemplou mais de 100 vídeos; após aplicação de critérios de relevância temática, discussão sobre tecnologias digitais, qualidade técnica e engajamento, 50 vídeos foram pré-

selecionados. O corpus final incluiu 18 vídeos, com aderência direta aos objetivos do estudo (Quadro 2).

Quadro 2. Processo de seleção da amostra.

Etapa	Quantidade de Vídeos	Critério Aplicado
Identificação inicial	100+	Busca por palavra-chave
Pré-seleção	50	Relevância temática e métricas digitais
Corpus final	18	Qualidade técnica e aderência ao objetivo

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

O processo de seleção da amostra buscou sistematizar a identificação e filtragem dos conteúdos digitais de forma progressiva, garantindo que apenas vídeos relevantes para os objetivos da pesquisa fossem analisados. A etapa inicial contemplou uma ampla busca por palavras-chave, seguida por uma pré-seleção baseada em relevância temática e métricas digitais, como visualizações e interações. Por fim, o corpus final foi delimitado considerando a qualidade técnica dos vídeos e sua aderência aos objetivos do estudo, assegurando consistência metodológica e representatividade qualitativa dos conteúdos analisados. Os critérios de seleção buscaram garantir consistência metodológica e representatividade qualitativa da amostra (Quadro 3).

Quadro 3. Critérios de inclusão.

Critério	Descrição
Relevância temática	Manejo, implantação, planejamento ou gestão de SAFs.
Tecnologia digital	Menção a software, planilhas, modelagem e monitoramento.
Qualidade técnica	Clareza, fundamentação prática e experiência do autor.
Engajamento	Visualizações, comentários e interação qualificada.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

Os critérios de inclusão definidos orientaram a seleção dos vídeos e a posterior análise de conteúdo, permitindo concentrar o estudo em materiais que abordassem efetivamente o manejo e planejamento de SAFs, com menção ao uso de tecnologias digitais. Ao priorizar qualidade técnica e engajamento, a pesquisa

considerou não apenas a pertinência temática, mas também a clareza das apresentações e a interação com o público, fatores que potencializam a validade das informações obtidas e fortalecem a confiabilidade das interpretações dos dados (Quadro 3).

3.2.3 Coleta e análise de dados

A análise de conteúdo seguiu as etapas propostas por Bardin (2016):

- I. Pré-análise: organização e exploração inicial do material audiovisual.
- II. Codificação temática: identificação de categorias analíticas definidas a priori, com base em referencial teórico, como percepção tecnológica, modelagem, planejamento produtivo, gestão econômica, monitoramento, desafios da digitalização e autonomia tecnológica (Quadro 4).
- III. Interpretação dos resultados: identificação de padrões discursivos, convergências e divergências entre os agroflorestores analisados.

A utilização de videoaulas como fonte empírica justifica-se pela atuação crescente dos agroflorestores como disseminadores de conhecimento técnico em ambientes virtuais, permitindo acesso a narrativas espontâneas, relatos de prática e demonstrações técnicas (Carvalho; Santos, 2025; Arangurí *et al.*, 2025). Além de subsidiar a compreensão da percepção dos usuários, essa análise permitiu identificar, de forma indireta, os atores envolvidos no processo de manejo agroflorestal, trabalhador rural, técnicos de assistência e extensão rural (ATERs), especialistas científicos, parceiros institucionais, agroflorestores e agricultores, conforme sistematizado na Figura 4, que também compôs subsídio para a definição dos atores do sistema SAF3D, Seção 3.3.

Quadro 4. Categorias analíticas definidas a priori com base no referencial teórico.

Categoria	Foco de Análise
Percepção tecnológica	Visão sobre inovação digital no campo
Modelagem	Planejamento espacial e sucessional
Gestão	Controle financeiro e produtivo
Monitoramento	Acompanhamento técnico do sistema
Desafios	Limitações estruturais e culturais

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

O Quadro 4 apresenta as categorias analíticas definidas a priori com base no referencial teórico adotado, que orientaram a codificação e interpretação dos dados. Cada categoria reflete um aspecto específico da relação dos agroflorestores com as tecnologias digitais: desde a percepção e uso de ferramentas para planejamento e modelagem, até a gestão econômica, monitoramento do sistema e os desafios encontrados no contexto agroecológico. Essas categorias permitiram organizar e sistematizar as informações coletadas, garantindo coerência entre os objetivos do estudo e a análise dos conteúdos selecionados.

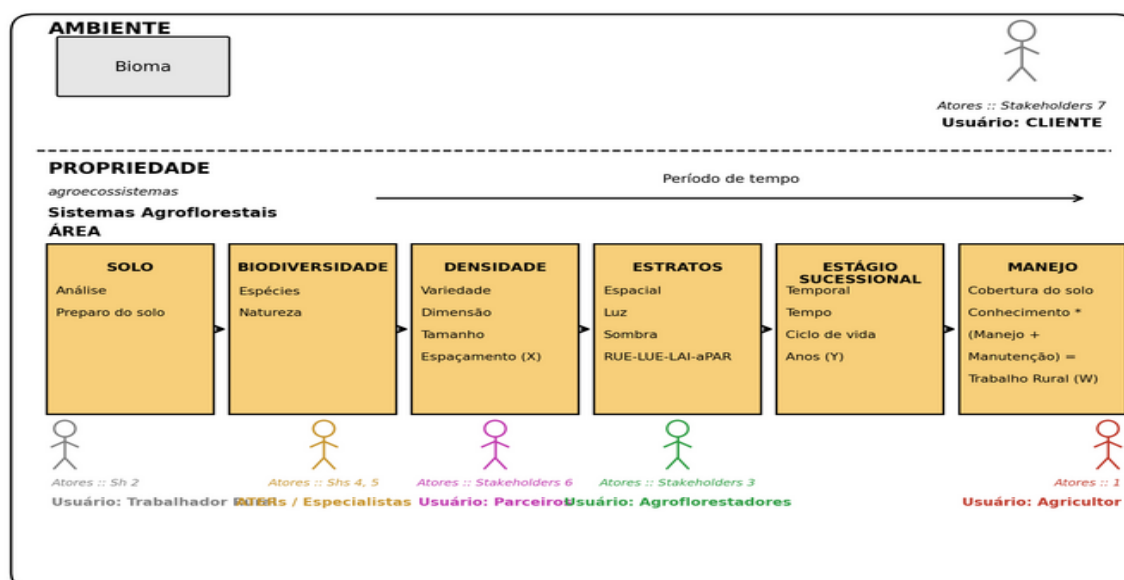


Figura 4. Processo linear do trabalho de manejo agroflorestal, com envolvidos em cada etapa.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

A Figura 4 apresenta, de forma esquemática e traduzida para o português, o processo linear de trabalho de manejo agroflorestal identificado a partir da análise das videoaulas, evidenciando a articulação entre o ambiente (bioma), a propriedade (agroecossistema e sistema agroflorestal) e as etapas técnicas de manejo, solo, biodiversidade, densidade, estratos, estágio sucessional e manejo propriamente dito, bem como os diferentes atores envolvidos em cada etapa desse processo.

Conforme evidenciado na Figura 4, o processo de manejo agroflorestal envolve múltiplos atores com papéis distintos, o trabalhador rural, responsável pela

execução operacional; os técnicos de assistência e extensão rural (ATERs) e especialistas científicos, que fornecem suporte técnico-científico; os parceiros institucionais, que viabilizam recursos e articulação; os próprios agroflorestores, detentores do conhecimento prático consolidado; e, por fim, o agricultor e o cliente final, que se beneficiam diretamente dos resultados do sistema produtivo.

Essa multiplicidade de atores reforça a complexidade do processo de manejo agroflorestal e evidencia a necessidade de que o artefato SAF3D contemple, em sua modelagem, diferentes perfis de usuários com necessidades e níveis de interação distintos, aspecto retomado na definição dos atores do sistema, na Seção 3.3.

3.3 LEVANTAMENTO E ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SAF3D

A partir da análise qualitativa das videoaulas (Seção 3.2) e da revisão da literatura técnico-científica (Revisão Bibliográfica, Capítulo 2), procedeu-se ao levantamento e à especificação formal dos requisitos do artefato SAF3D, etapa que antecede e fundamenta a modelagem em UML apresentada na Seção 3.4. Essa especificação seguiu a distinção clássica da Engenharia de Software entre requisitos funcionais, requisitos não funcionais e regras de negócio, complementada pela definição dos atores do sistema (SOMMERVILLE, 2015).

Os requisitos funcionais correspondem às funcionalidades que o sistema deve executar para atender às necessidades identificadas junto aos usuários (SOMMERVILLE, 2015), entre eles: (1) representar tridimensionalmente a estratificação vertical e o arranjo espacial de espécies em um SAF; (2) simular cenários de crescimento e sucessão ecológica ao longo do tempo; (3) calcular indicadores produtivos, econômicos e de sequestro de carbono associados a diferentes arranjos; (4) permitir a inserção, edição e comparação de diferentes configurações de plantio; e (5) gerar visualizações e relatórios que subsidiem a tomada de decisão sobre o planejamento do sistema.

Os requisitos não funcionais dizem respeito às qualidades e restrições que o sistema deve observar para ser efetivamente utilizável (SOMMERVILLE, 2015), incluindo: usabilidade da interface para usuários sem formação técnica em computação; desempenho computacional compatível com simulações tridimensionais; interoperabilidade com formatos de dados geoespaciais

amplamente utilizados; e escalabilidade para representar arranjos produtivos de diferentes portes e níveis de complexidade.

As regras de negócio estabelecem restrições e condições que orientam o comportamento do sistema no domínio agroecológico (SOMMERVILLE, 2015), por exemplo, a impossibilidade de sobreposição espacial incompatível entre espécies de um mesmo estrato, ou a necessidade de que simulações de sucessão respeitem os ciclos biológicos mínimos de cada espécie considerada.

Por fim, os atores do sistema foram definidos com base tanto na análise qualitativa das videoaulas (Figura 4) quanto na literatura sobre sistemas de apoio à decisão em agricultura, compreendendo: o pesquisador/desenvolvedor, responsável pela parametrização e manutenção do sistema; o agroflorestor ou agricultor, usuário final que planeja e avalia arranjos produtivos; o técnico ou especialista, que valida tecnicamente os resultados gerados; e o formulador de políticas públicas, que pode utilizar o artefato para subsidiar decisões em escala territorial. Essa especificação de requisitos e atores constitui a base sobre a qual se estruturou a modelagem em UML detalhada na Seção 3.4.6.

3.4 MODELAGEM EM UML PARA O DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO SAF3D

3.4.1 Delineamento da pesquisa

Esta pesquisa é caracterizada como aplicada, pois busca desenvolver uma solução tecnológica, o artefato SAF3D, voltada ao planejamento e à modelagem de Sistemas Agroflorestais (SAFs). Adota uma abordagem quali-quantitativa, combinando a análise quantitativa da produção científica por meio de cienciometria e bibliometria, a análise qualitativa de modelos conceituais, softwares e frameworks existentes, bem como o desenvolvimento estruturado da modelagem computacional utilizando UML. No que se refere aos objetivos, a pesquisa possui caráter exploratório e descritivo, uma vez que investiga lacunas tecnológicas na modelagem de SAFs e descreve formalmente a estrutura conceitual do sistema proposto.

3.4.2 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA: DESIGN SCIENCE RESEARCH

O desenvolvimento do artefato SAF3D fundamenta-se na *Design Science Research* (DSR), paradigma metodológico específico da Engenharia de Software e dos Sistemas de Informação voltado à criação e avaliação de artefatos que resolvam problemas relevantes identificados na prática. Segundo Hevner *et al.* (2004), a pesquisa em Sistemas de Informação é caracterizada por dois paradigmas complementares: o paradigma comportamental, voltado a desenvolver e verificar teorias que expliquem fenômenos humanos e organizacionais, e o paradigma de design, voltado a ampliar as capacidades humanas e organizacionais por meio da criação de artefatos novos e inovadores. Nesse segundo paradigma, o conhecimento científico é produzido não apenas pela observação de um fenômeno, mas pela própria construção e avaliação do artefato que o representa ou nele intervém.

Operacionalmente, adotou-se o modelo processual proposto por Peffers *et al.* (2007), a *Design Science Research Methodology* (DSRM), estruturado em seis atividades: (1) identificação do problema e motivação, correspondente à lacuna científica evidenciada na Revisão Bibliográfica; (2) definição dos objetivos da solução, explicitados nos objetivos geral e específicos desta dissertação; (3) concepção e desenvolvimento do artefato, por meio da modelagem UML e da posterior implementação computacional; (4) demonstração de sua aplicabilidade em cenários representativos de SAFs biodiversos; (5) avaliação do artefato quanto a seu desempenho e utilidade, detalhada na Seção 3.6; e (6) comunicação dos resultados à comunidade científica, materializada nesta dissertação e em publicações derivadas.

A adoção de prototipagem incremental e desenvolvimento iterativo, princípios centrais da Engenharia de Software contemporânea, permitiu que o SAF3D fosse concebido e refinado em ciclos sucessivos, nos quais cada versão do modelo conceitual foi avaliada e ajustada antes de avançar para níveis mais detalhados de especificação (diagrama de classes, casos de uso e componentes), assegurando maior aderência às necessidades identificadas na etapa de elicitação de requisitos.

3.4.3 Etapas metodológicas

A pesquisa foi estruturada em etapas metodológicas complementares e articuladas. Inicialmente, realizou-se uma análise cienciométrica e bibliométrica com o objetivo de identificar tendências, lacunas de conhecimento, modelos conceituais e softwares existentes relacionados à temática estudada. Essa etapa permitiu mapear o estado da arte, compreender a evolução das publicações científicas e reconhecer abordagens metodológicas consolidadas ou ainda pouco exploradas. Na sequência, aplicou-se a técnica de *snowball sampling*, utilizada para ampliar o levantamento bibliográfico a partir das referências citadas em trabalhos previamente selecionados. Esse procedimento possibilitou identificar estudos seminais e produções recentes de alta relevância, garantindo maior robustez e abrangência ao referencial teórico adotado.

Por fim, desenvolveu-se a modelagem conceitual em UML (*Unified Modeling Language*), etapa destinada à estruturação lógica do SAF3D. Nessa fase, foram definidas as classes, atributos e relações do sistema, organizando de forma sistemática os componentes e suas interações. A modelagem conceitual constitui, portanto, a base estrutural para a representação formal do funcionamento do modelo proposto, assegurando coerência, consistência e clareza na organização das informações.

3.4.4 Análise cienciométrica e bibliométrica

A análise bibliométrica foi realizada nas bases Web of Science, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink e Google Scholar, através da rede Confederada, Cafe, disponível na plataforma do Periódicos CAPES. Foram consideradas publicações entre 2019 e 2025. As buscas foram organizadas com apoio de thesaurus técnico e estruturadas em três eixos temáticos.

O Quadro 5 apresenta os eixos temáticos e as respectivas palavras-chave utilizadas na estratégia de busca e organização da revisão bibliográfica, estruturando conceitualmente o escopo da pesquisa.

Quadro 5. Eixos temáticos e palavras-chave utilizadas.

Eixo	Palavras-chave
Sistemas Agroflorestais	agroforestry systems; tropical agroforestry; agroecology
Modelagem e Software	decision support systems; agroforestry modelling; framework; dataset; digital agriculture
Tecnologias Digitais	LiDAR; digital twins; machine learning; 3D modelling vegetation; software; artifact

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

O primeiro eixo, Sistemas Agroflorestais, contemplou termos como *agroforestry systems*, *tropical agroforestry* e *agroecology*, assegurando a abrangência da literatura relacionada à base ecológica, produtiva e conceitual dos SAFs, especialmente em contextos tropicais. Esse eixo fundamenta o entendimento da estratificação vertical, da sucessão ecológica e da integração entre culturas agrícolas e espécies arbóreas, variáveis posteriormente incorporadas como atributos de classes na modelagem UML (Seção 3.4.6).

O segundo eixo, Modelagem e Software, incluiu palavras-chave como *decision support systems*, *agroforestry modelling*, *framework*, *dataset* e *digital agriculture*, direcionando a busca para estudos voltados ao desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão, estruturas computacionais e modelagens aplicadas à agricultura. Esse eixo foi essencial para embasar a construção conceitual do artefato SAF3D e sua arquitetura em UML, tendo subsidiado diretamente a identificação de módulos funcionais (Seção 3.5) e de requisitos de interoperabilidade (Seção 3.3).

O terceiro eixo, Tecnologias Digitais, incorporou termos como, *LiDAR*, *digital twins*, *machine learning*, *3D modelling vegetation*, *software* e *artifact*, ampliando a revisão para tecnologias emergentes aplicadas à modelagem tridimensional, análise espacial e simulação de cenários. Esse eixo sustenta a integração entre dados geoespaciais, representação estrutural da vegetação e ferramentas computacionais avançadas, tendo orientado a inclusão do módulo de aprendizado de máquina na arquitetura do SAF3D (Seção 3.5).

A organização da revisão a partir desses três eixos permitiu uma abordagem multidimensional, conectando ecologia, engenharia de software e tecnologias digitais. Dessa forma, o Quadro 5 evidencia a estratégia metodológica adotada para garantir abrangência, consistência e alinhamento entre o referencial teórico e o

desenvolvimento do SAF3D, não como um exercício de revisão quantitativa isolado, mas como insumo direto para decisões de modelagem, ao subsidiar a escolha de quais entidades, atributos e módulos deveriam compor o artefato.

Os critérios de inclusão adotados contemplam estudos primários que envolvam modelagem aplicada a Sistemas Agroflorestais (SAFs), softwares e sistemas de apoio à decisão, trabalhos com abordagem ecofisiológica ou espacial, publicações revisadas por pares e disponibilidade do texto completo. Por outro lado, os critérios de exclusão englobam trabalhos exclusivamente agronômicos sem modelagem, artigos opinativos ou sem método explícito, estudos duplicados e trabalhos fora do recorte temporal estabelecido.

3.4.5 Aplicação da técnica de *Snowball Sampling*

A técnica de *snowball sampling* foi utilizada como estratégia complementar de levantamento bibliográfico, com o objetivo de ampliar e aprofundar a identificação de estudos relevantes para a fundamentação teórica da pesquisa (WOHLIN, 2014).

Inicialmente, realizou-se uma busca estruturada em bases de dados científicas, a partir da qual foram selecionados artigos-base com base em critérios de relevância, atualidade e aderência temática. Em seguida, aplicou-se o procedimento de *backward snowballing*, por meio da análise das referências citadas nesses trabalhos, e de *forward snowballing*, identificando estudos que os citaram (WOHLIN, 2014).

O processo ocorreu de forma iterativa, com aplicação de critérios de inclusão e exclusão, até atingir a saturação teórica. A técnica possibilitou identificar trabalhos seminais, autores de referência e abordagens metodológicas relevantes, fortalecendo a consistência e abrangência da revisão de literatura que fundamenta o desenvolvimento do SAF3D.

3.4.6 Fluxo metodológico da revisão

O fluxo metodológico da revisão seguiu um processo estruturado em etapas sequenciais, iniciando pela identificação inicial de publicações nas bases indexadas, seguida da aplicação de filtros temporais e temáticos. Em seguida, procedeu-se à

leitura de títulos e resumos, para então realizar a leitura integral dos estudos considerados elegíveis. Posteriormente, aplicou-se a técnica de *snowball sampling*, culminando na consolidação do portfólio final de análise (Figura 5).

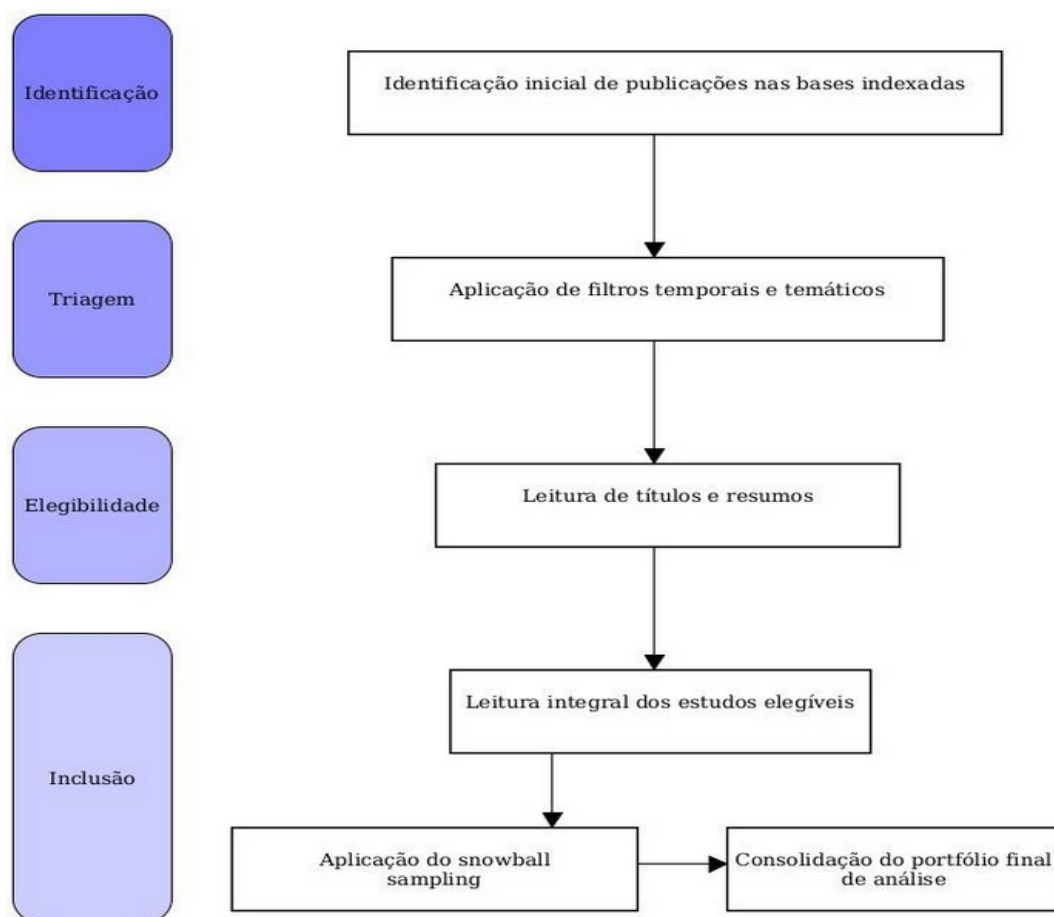


Figura 5. Fluxograma de Revisão Sistemática.

Fonte: elaborada com base em Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, The PRISMA Group (2009).

A Figura 5 apresenta o processo de seleção dos estudos incluídos na revisão, elaborado em um fluxograma adaptado do modelo PRISMA, que apresenta as etapas sequenciais desde a identificação inicial das publicações até a consolidação do portfólio final de análise.

3.4.7 Desenvolvimento da modelagem UML do artefato SAF3D

Com base na revisão da literatura e na especificação de requisitos apresentada na Seção 3.3, elaborou-se a modelagem em UML do SAF3D,

estruturada em quatro níveis e tipos de modelagem utilizados no desenvolvimento do sistema para Sistemas Agroflorestais (SAFs).

A escolha da UML (*Unified Modeling Language*) como linguagem de modelagem justifica-se por sua ampla adoção na Engenharia de Software para representar sistemas complexos por meio de diagramas padronizados, o que facilita a comunicação entre pesquisadores, desenvolvedores e demais interessados, além de reduzir ambiguidades na especificação do software (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 1999). Por se tratar de uma notação amplamente reconhecida e documentada internacionalmente, a UML favorece tanto a reprodutibilidade da modelagem quanto sua eventual adaptação por outros pesquisadores e equipes de desenvolvimento em trabalhos futuros.

No nível de modelagem conceitual, ocorre a identificação das entidades principais que compõem o domínio do sistema, como Sistema Agroflorestal, Estrato, Espécie, Parcela, Cenário e Simulação, proporcionando uma visão geral e estruturada dos elementos essenciais. O diagrama de classes detalha essa modelagem ao definir atributos, métodos, heranças e associações entre as classes, oferecendo uma representação mais técnica e orientada à programação (Quadro 6).

Quadro 6. Estrutura da Modelagem UML.

Nível	Descrição
Modelagem Conceitual	Identificação das entidades principais (Sistema Agroflorestal, Estrato, Espécie, Parcela, Cenário, Simulação)
Diagrama de Classes	Definição de atributos, métodos, heranças e associações
Diagrama de Casos de Uso	Planejamento, simulação, análise econômica e avaliação de serviços ecossistêmicos
Diagrama de Componentes	Módulos ecológico, produtivo, econômico, integração 3D e aprendizado de máquina

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

Outros diagramas, como o diagrama de casos de uso, o diagrama de atividades e o diagrama de componentes, complementam essa estrutura ao mapear as interações dos usuários, definidos na Seção 3.3 — com o sistema e a organização dos módulos internos, respectivamente, conforme detalhado na Seção 3.5.

3.5 ARQUITETURA DO SISTEMA SAF3D

A arquitetura proposta para o artefato SAF3D organiza-se em módulos funcionais interdependentes, definidos a partir da especificação de requisitos (Seção 3.3) e da modelagem UML (Seção 3.4.7), seguindo o princípio de que a arquitetura de um sistema deve refletir e viabilizar seus atributos de qualidade, como modificabilidade, interoperabilidade e desempenho, desde as etapas iniciais de concepção (BASS; CLEMENTS; KAZMAN, 2012).

O módulo ecológico é responsável por armazenar e processar informações relativas à estratificação vertical, à diversidade funcional e à sucessão ecológica das espécies que compõem o SAF, alimentando os cálculos de interceptação luminosa e competição radicular entre indivíduos. O módulo produtivo trata da parametrização de espécies quanto a ciclos de produção, densidade de plantio e arranjos espaciais, subsidiando a simulação de cenários de manejo. O módulo econômico calcula indicadores de viabilidade financeira, custos de implantação e manutenção, e potencial de geração de renda associados a cada arranjo simulado (BASS; CLEMENTS; KAZMAN, 2012).

O módulo de visualização tridimensional constitui a camada responsável pela representação gráfica dos arranjos produtivos, permitindo ao usuário observar, em ambiente 3D, a disposição espacial das espécies e suas interações ao longo do tempo. O módulo de banco de dados armazena de forma estruturada as informações ecológicas, produtivas e econômicas, bem como os cenários simulados, garantindo persistência, integridade e recuperação eficiente dos dados. Por fim, o módulo de inteligência artificial incorpora algoritmos de aprendizado de máquina destinados a apoiar previsões de produtividade e recomendações de arranjos otimizados, a partir de padrões identificados em bases de dados históricas e nos cenários previamente simulados.

Esses módulos comunicam-se entre si por meio de interfaces bem definidas: o módulo ecológico fornece parâmetros de entrada para o módulo produtivo, que por sua vez alimenta o módulo econômico e o módulo de visualização; o módulo de banco de dados atua como camada transversal, disponibilizando e recebendo dados de todos os demais módulos; e o módulo de inteligência artificial consome dados históricos armazenados para gerar recomendações que retroalimentam o módulo

produtivo. Essa organização modular, inspirada em princípios de arquitetura de software desacoplada (BASS; CLEMENTS; KAZMAN, 2012), favorece a manutenibilidade do sistema e permite que módulos individuais sejam aprimorados ou substituídos sem comprometer o funcionamento do artefato como um todo.

3.6 VALIDAÇÃO DO ARTEFATO SAF3D

Em consonância com a quinta atividade da DSRM proposta por Peffers *et al.* (2007), avaliação do artefato, a validação do SAF3D foi concebida a partir de abordagens multimétodos, combinando estratégias conceituais, estruturais e funcionais. A validação conceitual consistiu na comparação sistemática entre a modelagem proposta e os modelos internacionais de referência identificados na Revisão Bibliográfica (Hi-sAFe, Yield-SAFE, WaNuLCAS, OpenAlea, GroIMP e APSIM), verificando se as variáveis e relações consideradas no SAF3D eram compatíveis com os fundamentos ecofisiológicos e computacionais consolidados na literatura.

A validação estrutural envolveu a revisão da consistência interna dos diagramas UML produzidos, conceitual, de classes, de casos de uso e de componentes, verificando a coerência entre entidades, atributos, relacionamentos e fluxos de interação especificados para assegurar que a arquitetura proposta (Seção 3.5) estivesse livre de inconsistências lógicas ou lacunas de especificação.

Por fim, a validação funcional foi conduzida por meio de testes de simulação de cenários hipotéticos de manejo agroflorestal, avaliando se o artefato é capaz de gerar resultados coerentes com o comportamento esperado de um SAF biodiverso diante de diferentes arranjos e configurações. Embora a presente dissertação tenha priorizado a validação conceitual e estrutural do artefato, dado o escopo do trabalho de mestrado/doutorado, recomenda-se que etapas futuras de desenvolvimento incluam também a avaliação por especialistas (agroflorestores e pesquisadores da área), testes de usabilidade com usuários finais e estudos de caso em propriedades rurais reais para complementar a validação técnica com evidências de aplicabilidade prática.

3.7 SÍNTESE METODOLÓGICA: RELAÇÃO ENTRE OBJETIVOS E ETAPAS

O Quadro 7 sistematiza a relação entre os objetivos específicos desta dissertação e as etapas metodológicas correspondentes, evidenciando a coerência interna da pesquisa e a articulação entre cada frente metodológica e os resultados pretendidos.

Quadro 7. Relação entre os objetivos específicos e as etapas metodológicas.

Objetivo Específico	Etapa(s) Metodológica(s) Correspondente(s)
I. Analisar a literatura e a percepção dos usuários sobre tecnologias digitais aplicadas ao planejamento de SAFs	Seções 3.2 (Análise da percepção de agroflorestores) e 3.4.4 (Análise cienciométrica e bibliométrica)
II. Elaborar a modelagem UML do artefato SAF3D para representar tridimensionalmente diferentes arranjos produtivos agroecológicos	Seções 3.3 (Levantamento e especificação de requisitos), 3.4.6–3.4.7 (Fluxo metodológico e modelagem UML) e 3.5 (Arquitetura do sistema)

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

Conforme evidenciado no Quadro 7, cada objetivo específico desta dissertação encontra correspondência direta em etapas metodológicas concretas, o que assegura a coerência interna da pesquisa e evidencia que a articulação entre elicitação de requisitos, fundamentação teórica, modelagem UML e desenvolvimento do artefato SAF3D não ocorreu de forma fragmentada, mas como um percurso metodológico integrado. Essa correspondência reforça, ainda, que os resultados apresentados no capítulo seguinte decorrem diretamente dos procedimentos aqui descritos, estabelecendo uma relação de rastreabilidade entre o que foi proposto nos objetivos, o que foi metodologicamente executado e o que será, a seguir, analisado e discutido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desta pesquisa são apresentados em seis frentes complementares, organizadas para refletir diretamente as etapas metodológicas descritas no capítulo anterior: (1) a percepção dos agroflorestores sobre tecnologias digitais aplicadas a Sistemas Agroflorestais (SAFs), obtida por meio da análise de videoaulas; (2) o levantamento e a especificação de requisitos do artefato SAF3D; (3) a análise cienciométrica e bibliométrica da produção científica sobre o tema; (4) a modelagem em UML do artefato; (5) a arquitetura resultante do sistema; e (6) os resultados da validação conceitual, estrutural e funcional do SAF3D. Essa organização assegura que cada resultado apresentado possa ser diretamente relacionado à etapa metodológica que o produziu, conforme sintetizado no Quadro 13 da Metodologia.

4.1 PERCEPÇÃO DE AGROFLORESTORES SOBRE O USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS EM SAFS

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos a partir da análise do corpus composto por 18 videoaulas produzidas por agroflorestores experientes, selecionadas conforme os critérios metodológicos definidos na Seção 3.2. A análise buscou responder à questão central do estudo, examinando como esses atores percebem e incorporam tecnologias digitais na modelagem, no planejamento e na gestão de SAFs biodiversos.

A Figura 6 apresenta, de forma sistematizada e visual, as etapas estruturantes dos três eixos que fundamentam a pesquisa: a percepção dos agroflorestores, a revisão de literatura e a modelagem do SAF3D.

O primeiro eixo refere-se à percepção dos agroflorestores, contemplando a coleta e análise de informações obtidas diretamente com os agricultores envolvidos, a fim de compreender suas experiências práticas, desafios, expectativas e contribuições relacionadas à implementação dos SAFs. O segundo eixo corresponde à revisão de literatura, que fornece o embasamento teórico e metodológico do estudo. Por fim, o terceiro eixo diz respeito à modelagem do SAF3D, etapa em que os dados empíricos e o arcabouço teórico são integrados para o desenvolvimento da

proposta metodológica e estrutural do modelo. Como evidenciado na Figura 6, esse percurso articula conhecimento prático, fundamentação científica e inovação tecnológica.

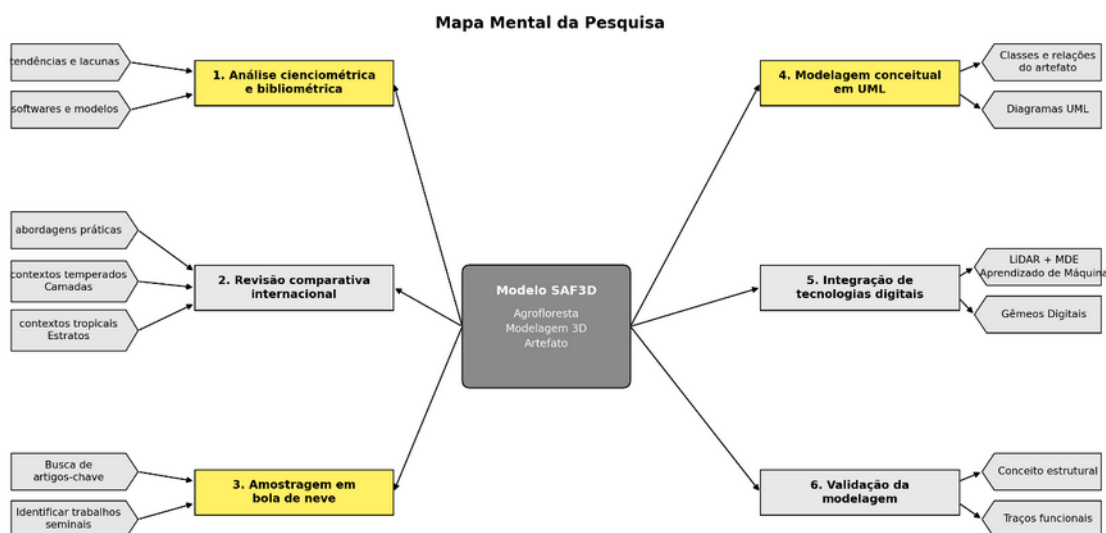


Figura 6. Mapa mental da jornada de pesquisa para a construção do SAF3D.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

Para fins de organização analítica, os resultados desta seção foram estruturados em subseções que examinam, sucessivamente: as ferramentas digitais existentes identificadas previamente ao desenvolvimento do SAF3D; a percepção dos agroflorestores acerca do uso dessas tecnologias; o perfil dos agroflorestores analisados; as categorias de percepção identificadas; os fatores que influenciam a adoção dessas tecnologias; sua adaptação à realidade dos SAFs; e, por fim, a aplicação da classificação de sistemas agroflorestais ao escopo do SAF3D.

4.1.1 Ferramentas digitais identificadas previamente ao desenvolvimento do SAF3D

A literatura recente aponta avanços significativos no desenvolvimento de aplicativos digitais e modelos computacionais voltados ao manejo de sistemas agroflorestais biodiversos, ampliando o suporte à identificação de espécies,

planejamento produtivo, monitoramento ambiental e gestão da propriedade. Modelos integrativos têm incorporado variáveis econômicas, produtivas e ambientais em ambientes de simulação espacial, permitindo projeções de produtividade e avaliação de serviços ecossistêmicos, com foco na resiliência e sustentabilidade dos SAFs (Tscharntke *et al.*, 2012; Felipe *et al.*, 2023).

A incorporação de tecnologias como Big Data, Inteligência Artificial e Internet das Coisas amplia as possibilidades de monitoramento em tempo real e suporte à decisão. Contudo, persistem lacunas relacionadas à representação dinâmica da estratificação funcional, da sucessão agroecológica e da complexidade tridimensional dos SAFs tropicais, lacuna que justifica diretamente o desenvolvimento do SAF3D, conforme discutido na Revisão Bibliográfica (Seção 2.8) e retomado nos requisitos especificados na Seção 4.2.

O Quadro 8 sistematiza os aplicativos móveis analisados previamente ao desenvolvimento do SAF3D.

Quadro 8. Aplicativos analisados na fase prévia do desenvolvimento do artefato SAF3D.

Aplicativo	Descrição	Desenvolvedor
ZARC – Plantio Certo	Zoneamento agrícola de risco climático e gestão de riscos para a agricultura	Embrapa
Trees	Medição e georreferenciamento de árvores	Forest Monitoring Tools
Sun Locator	Localização solar	Zipo Apps
Radis Cerrado	Radiografia do bioma Cerrado e monitoramento de recomposição da vegetação nativa	UnB CEGAFI
Pl@ntNet	Identificação de espécies por fotografia	PlantNet
Plantix	Identificação e diagnóstico de pragas e doenças em espécies	Plantix
GPS Agroflorestal	Mapeamento de árvores plantadas e rastreabilidade	Agroforestry Carbon DEV
Forest Tree Identification	Identificador de árvores	Discovery Green Lab
Forest Island	Jogo de plantio de floresta em uma ilha	Nanali Studios
Forest: Mantenha o Foco	Jogo gerenciador de tempo através da simulação de plantio de floresta	Forest App / ONG Trees for the Future
Floresta	Rádio paraense com temática agroflorestal	Sistema Floresta de Comunicação – SBT

Distance; Land Area Measure	Medição de distância e área terrestre por GPS e POI	Growup Infotech
Cultivar	Assistente de planejamento e cultivo de plantas	Cultivar Digital
BioInsumos	Produtos biológicos e inoculantes para controle de pragas e doenças	Embrapa
AegroCampo	Gestão, monitoramento e operação rural a distância e em tempo real	Aegro Informática Ltda
AccuWeather	Tempo e clima local e mundial em tempo real, com alertas e previsões	AccuWeather

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

Aplicativos como Radis Cerrado, BioInsumos, AegroCampo e AccuWeather oferecem suporte ao monitoramento ambiental, manejo sustentável, gestão remota e previsão climática, enquanto ferramentas educativas, como Forest Island e Forest: Mantenha o Foco, contribuem para a conscientização ambiental. Entretanto, essas tecnologias atuam de forma predominantemente setorial, sem integrar aspectos essenciais dos SAFs biodiversos, como estratificação vertical, sucessão agroecológica e dinâmica da biomassa (Somarriba, 1992). Essa limitação evidencia a demanda por soluções digitais mais integradas, como o SAF3D, capazes de articular planejamento espacial e simulação agroecológica em um único ambiente digital.

Além dos aplicativos móveis, diversas plataformas digitais especializadas têm sido desenvolvidas para monitoramento e apoio à gestão de SAFs, incorporando funcionalidades mais complexas de análise ambiental, simulação e planejamento.

Essas plataformas ampliam a capacidade de análise e planejamento dos SAFs, complementando os aplicativos móveis ao oferecer suporte a decisões estratégicas, simulações espaciais e integração de dados ambientais e produtivos. Ferramentas como o Ke-SAF, um artefato tipo maquete física, permitem visualizar a estratificação vertical e a diversidade funcional, contribuindo para o planejamento participativo e a educação ambiental (Somarriba, 1992). O Quadro 9 apresenta exemplos dessas plataformas.

Quadro 9. Plataformas digitais de monitoramento e apoio para SAF.

Aplicação	Desenvolvedor	Descrição
Global Forest Watch	World Resources Institute (WRI)	Plataforma online de monitoramento de florestas em tempo real no mundo.
ShadeMotion	CATIE	Aplicação de sombra para medição de luminosidade em SAF.
MACView	Embrapa	Identificação de macaúba e cupuaçu por drone e fotogrametria.
Infográfico NatGeo	National Geographic	Simulador gráfico de desenvolvimento temporal do SAF em clareira de floresta amazônica.
Tree Belt Designer	QGIS / Projeto Verena / WRI Brasil	Aplicação de sombra em SAFs; projeção e viabilidade financeira.
Ke SAF: Kit Elaborador de SAF	LabDesign – FAU-USP	Maquete física de SAF com tabuleiro e peças representando espécies do Cerrado e Mata Atlântica.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

As *Application Programming Interfaces* (APIs)¹ são essenciais para a interoperabilidade entre aplicativos, bancos de dados e plataformas digitais, viabilizando funcionalidades como autenticação de usuários, geolocalização, processamento de dados espaciais, armazenamento em nuvem e integração com serviços externos (Fielding, 2000). No contexto da agricultura digital, APIs consolidam dados climáticos, produtivos e ambientais, favorecendo sistemas integrados de apoio à decisão (Wolfert *et al.*, 2017), princípio diretamente incorporado à arquitetura do SAF3D, detalhada na Seção 4.5.

Entre as plataformas digitais de monitoramento e apoio à decisão destacam-se ShadeMotion, AgroforesTreeAdvice, Brazil Data Cube, 3D Forest, AnaliSAFs, Go.Floresta, AgroforLight 3D, Yield-SAFE, Farm-SAF, DynACof, Hi-sAF, CROPGRO, DayCent, E-Planner e SAFA, que combinam modelagem ecofisiológica, simulações multiestrato e integração de dados climáticos e de solo, permitindo avaliações de produtividade e serviços ecossistêmicos.

O Quadro 10 apresenta os artefatos mais relevantes concebidos a partir dos modelos pesquisados, sistematizando suas funções, entradas, saídas e desenvolvedores.

¹ Conjunto de protocolos e rotinas que permitem que componentes de diferentes softwares se comuniquem e transfiram dados entre si.

Quadro 10. Artefatos mais relevantes concebidos a partir dos modelos pesquisados.

Software/Artefato	Função principal	Entradas / Saídas	Fonte
ShadeMotion	Modelagem de padrão de sombra espacial	Entradas: parâmetros de copa e projeção da sombra. Saídas: mapas de sombra por hora.	Somarriba (2012)
AgroforesTreeAdvice	Suporte à seleção de espécies / DSS	Entradas: parâmetros locais e objetivos do produtor. Saídas: recomendações de espécies.	Gosme (2025)
Brazil Data Cube	Fornecimento de dados analíticos e séries temporais	Entradas: imagens Sentinel e Landsat. Saídas: séries temporais, uso do solo, índices de vegetação.	Ferreira <i>et al.</i> (2020)
3DFin	Inventário 3D por nuvem de pontos (TLS)	Entradas: nuvens de pontos TLS. Saídas: diâmetro, altura e posição das árvores.	Laino <i>et al.</i> (2023)
3D Forest	Descrição de estruturas 3D (TLS)	Entradas: nuvens de pontos TLS. Saídas: segmentação de árvores e dossel.	Trochta <i>et al.</i> (2017)
AnaliSAFs	Análise socioambiental e financeira de SAFs	Entradas: dados de produção. Saídas: indicadores financeiros e viabilidade econômica.	Arco-Verde (2014)
Go.Floresta	Ferramenta educacional sobre sucessão agroecológica	Entradas: interações pedagógicas. Saídas: simulações educativas.	Rocha (2022)
AgroforLight 3D	Distribuição de luz em ambiente 3D	Entradas: cálculo de sombra e disposição das árvores. Saídas: mapas de distribuição de luz.	De Swaef <i>et al.</i> (2025)

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

Observa-se uma diversidade de ferramentas que variam desde modelos bidimensionais de parcela, como Hi-sAFe e Yield-SAFE (Dupraz *et al.*, 2019), até simulações tridimensionais mais complexas, como AgroforLight-3D e 3D Forest. Quanto à interface, há tanto sistemas com interface gráfica amigável quanto soluções baseadas em *scripts*, destinadas a usuários com maior conhecimento técnico em modelagem computacional.

Essa diversidade evidencia avanços na modelagem e no suporte à decisão em SAFs, mas ressalta lacunas metodológicas importantes, sobretudo na integração simultânea de estratificação vertical, sucessão agroecológica, dinâmica de biomassa e análise econômica. Tais limitações reforçam a necessidade de plataformas integradoras, como o SAF3D, capazes de consolidar informações agroecológicas,

produtivas e socioeconômicas em um único ambiente digital.

4.1.2 Percepção dos agroflorestores sobre o uso de tecnologias digitais

Para compreender a percepção dos agroflorestores em relação às tecnologias digitais, foi analisado o corpus de 18 videoaulas. O Quadro 11 apresenta o perfil dos principais agroflorestores identificados, seus canais e a abordagem temática predominante em suas produções. No Anexo I consta a lista de todos os vídeos.

Quadro 11. Perfil dos agroflorestores, canais e abordagens das videoaulas analisadas.

Agroflorestor	Canal	Abordagem
Ernst Götsch	Agenda Gotsch	Agricultura sintrópica. Manejo intensivo dos estratos florestais. Uso eficiente da biomassa e luminosidade solar.
Fernando Rebello	CEPEAS	Experimentos e aprendizagens agroflorestais. Curso completo de implementação de SAF, do início ao manejo.
Antonio Gomides	Manual da Agrofloresta	Arte agroflorestal. Curso 'Desafio 30 dias, meu primeiro SAF'. Diagnóstico e design.
Fabiana Peneireiro	Mutirão Agroflorestal	Trabalho coletivo, abordagem pedagógica, público feminino, SAF em mutirões com jovens e idosos.
Mauricio Hoffmann	DNA Agroflorestal	Dinâmica econômica de SAFs: VPL, TIR, ponto de equilíbrio. Medida espacial e agrônoma de viabilidade.
Lucas Machado	Sítio das Mangueiras	Manejo com cultivos agroecológicos. Sustentabilidade econômica com foco no fluxo de caixa e manejos coletivos.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

A diversidade temática apresentada no Quadro 11 reflete diferentes enfoques e níveis de aprofundamento técnico e pedagógico sobre os SAFs. Destacam-se desde abordagens voltadas para práticas agroecológicas e manejo intensivo dos estratos vegetais, como as propostas por Ernst Götsch, até cursos estruturados para implementação integral do SAF, como os ministrados por Fernando Rebello.

A presença de conteúdos que privilegiam a dimensão coletiva e social do manejo, especialmente com foco em público feminino e comunidades diversas (Fabiana Peneireiro), indica também uma percepção ampliada da agrofloresta que vai além dos aspectos técnicos. Além disso, videoaulas com ênfase na sustentabilidade econômica e na gestão financeira, como as de Mauricio Hoffmann e Lucas Machado, demonstram que a incorporação de tecnologias digitais é percebida

como um importante suporte para planejamento econômico e viabilidade dos sistemas.

O Quadro 11 não apenas apresenta os atores envolvidos na produção dos conteúdos digitais, mas também fundamenta a diversidade das percepções coletadas entre os agroflorestores experientes — pluralidade que reflete diferentes níveis de conhecimento e enfoques técnicos, sociais e econômicos. Para melhor compreensão dessas variações, o Quadro 12 sistematiza as categorias de percepção identificadas na análise, classificando-as em favoráveis, críticas e ambivalentes.

Quadro 12. Categorias de percepção identificadas na análise.

Categoria de Percepção	Frequência	Exemplo de Trecho
Favorável	11	“O software facilita o planejamento do consórcio de espécies.”
Crítica	5	“É muito complexo e não se adapta totalmente à nossa realidade.”
Ambivalente	2	“Útil, mas ainda depende do conhecimento empírico do campo.”

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

As percepções favoráveis predominantes destacam os benefícios das tecnologias digitais no apoio à tomada de decisão, monitoramento e planejamento integrado dos SAFs, especialmente pela capacidade de simular cenários produtivos e antecipar riscos em sistemas biodiversos complexos (FAO; CIRAD, 2021). Por outro lado, críticas ressaltam a complexidade técnica, a baixa adaptação ao contexto local e a infraestrutura digital limitada em áreas rurais, fatores que dificultam sua adoção plena (Arangurí *et al.*, 2025). Percepções ambivalentes indicam que, apesar da utilidade reconhecida, o uso eficaz dessas ferramentas depende da integração com o conhecimento empírico e práticas tradicionais (Andrade; Ferraz Almeida, 2022; Carvalho; Santos, 2025).

Os agroflorestores enxergam as tecnologias digitais como potencializadoras, porém condicionadas às especificidades agroecológicas, sociais e técnicas do meio rural.

4.1.3 Comparação entre agroflorestores: estratificação, planejamento e uso de tecnologias digitais

Entre os agroflorestores analisados, observa-se que todos valorizam a estratificação vertical e a sucessão agroecológica como princípios centrais para os SAFs, promovendo biodiversidade e estabilidade agroecológica. Apesar de compartilharem essa filosofia, a aplicação prática e o planejamento temporal apresentam diferenças: Ernst Götsch enfatiza uma abordagem agroecológica empírica de longo prazo, Fernando Rebello integra planejamento técnico e ciclos de produção, e Lucas Machado prioriza a didatização e a visualização da sucessão para fins pedagógicos. Quanto ao uso de tecnologias digitais, Götsch apresenta utilização limitada, Rebello faz uso moderado para gestão e planejamento, e Machado aplica recursos digitais para representação didática. Essas convergências e diferenças estão detalhadas no Quadro 13.

Quadro 13. Comparação analítica entre agroflorestores quanto à estratificação, planejamento e uso de tecnologias digitais.

Categoria de Análise	Ernst Götsch	Fernando Rebello	Lucas Machado
Principais estratos enfatizados	Emergente, alto, médio-alto, médio, médio-baixo, baixo, rasteiro	Emergente, alto, médio, baixo, rasteiro	Médio, baixo, rasteiro
Princípio estruturante	Sucessão agroecológica e estratificação vertical	Funcionalidade agroecológica de espécies e consórcios	Didatização da sucessão e organização visual
Ênfase no planejamento	Planejamento sucessional de longo prazo	Planejamento por ciclos (curto, médio, longo prazo)	Estruturação pedagógica e cronogramas
Uso de tecnologias digitais	Baixo a moderado — uso indireto	Moderado — planilhas e mapas de plantio	Moderado — representações gráficas digitais

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

Em síntese, embora a filosofia agroecológica seja comum, a aplicação prática, o planejamento temporal e a integração tecnológica variam conforme os objetivos de cada autor, combinando tradição agroecológica e inovação digital.

4.1.4 Fatores que influenciam a adoção das tecnologias

Os resultados indicam que a adoção das tecnologias digitais está diretamente associada à percepção de utilidade prática e facilidade de uso. Quando os agroflorestores identificam benefícios concretos, especialmente na gestão financeira e na organização produtiva, a incorporação tende a ser mais consistente. Por outro lado, barreiras como falta de capacitação específica, infraestrutura de conectividade limitada e custo de implementação reduzem a adoção efetiva, mesmo quando o potencial das ferramentas é reconhecido. O Quadro 14 sistematiza os fatores que influenciam essa adoção.

Quadro 14. Fatores que influenciam a adoção das tecnologias.

Fator	Tipo	Impacto na Adoção	Observações
Escolaridade e experiência digital	Sociodemográfico	Facilita	Agricultores mais familiarizados adotam mais rapidamente.
Complexidade do SAF	Contextual	Pode limitar	Sistemas grandes exigem ferramentas mais sofisticadas.
Suporte institucional	Estrutural	Facilita	Treinamento aumenta confiança e uso efetivo.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

A escolaridade e a experiência prévia com ferramentas digitais facilitam a incorporação das tecnologias, uma vez que agricultores mais familiarizados conseguem compreender e aplicar os recursos disponíveis com maior rapidez e segurança. A complexidade do SAF pode representar uma barreira à adoção, especialmente em propriedades maiores ou mais biodiversas. O suporte institucional, incluindo treinamento e assistência técnica, desempenha papel fundamental ao aumentar a confiança dos usuários. Esses achados corroboram estudos anteriores, que indicam que a adoção de inovações tecnológicas no meio rural depende não apenas da percepção de utilidade, mas também do contexto social, técnico e institucional do agricultor (Carvalho; Santos, 2025).

4.1.5 Adaptação das ferramentas digitais à realidade dos SAFs

A análise revelou que muitos agricultores combinam ferramentas digitais com métodos tradicionais de manejo, configurando soluções híbridas que integram registros digitais, observação empírica e conhecimento ecológico acumulado. No caso específico do SAF3D, sua principal contribuição está na integração de funcionalidades em um único ambiente digital, permitindo simulação da estratificação vertical, organização espacial das espécies e planejamento sucessional.

O Quadro 15 evidencia como os agroflorestores adaptam as tecnologias digitais às especificidades de seus SAFs.

Quadro 15. Adaptação tecnológica.

Ferramenta	Tipo de Adaptação	Benefícios Percebidos	Limitações Identificadas
SAF3D	Integração com métodos tradicionais	Planejamento espacial e sucessão agroecológica; aprendizagem efetiva	Curva de aprendizado inicial; alta complexidade de variáveis
ShadeMotion	Aplicativo pedagógico de projeção de sombra	Visualização didática do sombreamento	Não contempla estrato nem ciclo de vida das espécies
AnaliSAFs	Planilha de receitas e custos	Maior precisão financeira	Complexidade para manipular os dados

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

Ferramentas mais integradas, como o SAF3D, são combinadas com métodos tradicionais de manejo, proporcionando benefícios como planejamento espacial eficiente e organização sucessional das espécies, embora apresentem limitações iniciais relacionadas à curva de aprendizado. Em contraste, aplicativos isolados são geralmente utilizados de forma complementar ao registro manual. Esses resultados indicam que a adaptação tecnológica é seletiva e crítica, reforçando a ideia de que os agricultores buscam soluções híbridas que conciliem inovação digital e conhecimento empírico consolidado no campo (Arangurí *et al.*, 2025; Carvalho; Santos, 2025).

Em síntese, a questão central do estudo pode ser respondida a partir da análise dos dados: os agroflorestores percebem as tecnologias digitais como instrumentos úteis para apoiar a modelagem, o planejamento e a gestão dos SAFs

biodiversos tropicais, valorizando especialmente recursos que facilitam a organização espacial, o planejamento sucessional e o monitoramento produtivo.

4.1.6 Classificação dos sistemas agroflorestais e aplicação ao SAF3D

A Figura 7 sistematiza, em português, os 18 tipos de sistemas agroecológicos identificados por Nair (1985), organizados em três categorias principais: agrossilvipastoril, agrossilvicultural e silvipastoril.

Classificação dos Sistemas Agroflorestais (Nair, 1991)

Agrossilvipastoril <i>Árvores + cultivos + pastagem e/ou animais</i> Exemplos: - Quintais produtivos com animais - Cercas vivas multipropósito - Apicultura arborizada - Aquiflorestas - Lotes florestais multipropósito Arranjo: Combinação intensiva e multiestrato de árvores, cultivos e animal no mesmo espaço.	Agrossilvicultural (foco do SAF3D) <i>Arbustos + cultivos + árvores, trepadeiras e árvores</i> Exemplos: - Pousio melhorado - Cultivo em aleias (alley cropping) - Quintais agroflorestais multiestrato - Árvores multipropósito em lavouras - Combinações de cultivo com plantação - Quintais agroflorestais (homegardens) Arranjo: Espécies lenhosas plantadas e deixadas na área, combinadas com cultivos agrícolas.	Silvipastoril <i>Árvores + pastagem e/ou animais</i> Exemplos: - Árvores em pastagens naturais - Bancos de proteína (forragem) - Cultivos de plantação com pastagem e animais Arranjo: Árvores dispersas ou organizadas segundo algum arranjo sistemático na pastagem.
--	--	--

O SAF3D tem como foco principal os sistemas agrossilviculturais, especialmente os quintais agroflorestais (homegardens), por evidenciarem a estratificação vertical das espécies.

Figura 7. Classificação dos sistemas agroflorestais segundo Nair (1985).

Fonte: elaboração própria, adaptado e traduzido a partir de Nair (1985).

O SAF3D tem como foco principal os sistemas agrossilviculturais, que evidenciam a organização espacial e a estratificação vertical das espécies vegetais, sem componente de criação animal, com destaque para os quintais agroflorestais (*homegardens*), por reunirem de forma mais evidente a diversidade funcional característica desses sistemas. O modelo padrão utilizado para a modelagem foi um *homegarden* de 25×10 metros, com horizonte de simulação de 25 anos, em região tropical, a aproximadamente 470 metros de altitude (22°12'2"S, 54°55'32"W), com solo argiloso e pH 4,8.

Essa modelagem permite compreender como múltiplos estratos vegetativos interagem, favorecendo a ciclagem de nutrientes, o uso eficiente de luz e a resiliência agroecológica (FAO; CIRAD, 2021). Estudos recentes corroboram que SAFs biodiversos estruturados com múltiplos estratos e consórcios estratégicos apresentam maior estabilidade agroecológica, melhor sequestro de carbono e produtividade contínua ao longo do tempo (Andrade; Ferraz Almeida, 2022; Li *et al.*, 2021).

A utilização do SAF3D possibilita simular digitalmente essa organização, permitindo antecipar cenários de crescimento e sucessão agroecológica e ajustar a escolha de espécies e arranjos espaciais. O modelo reforça, ainda, o conceito de soluções baseadas na natureza (*Nature-based Solutions* – NbS), que visam aumentar a resiliência de sistemas socioecológicos frente a impactos ambientais e mudanças climáticas (Seddon *et al.*, 2020).

4.2 RESULTADOS DO LEVANTAMENTO E ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SAF3D

Conforme descrito na Seção 3.3, o levantamento de requisitos do SAF3D partiu diretamente dos achados da Seção 4.1: a análise das videoaulas e a revisão da literatura evidenciaram tanto as funcionalidades demandadas pelos agroflorestores quanto as limitações das ferramentas digitais existentes (Quadros 1 a 3). A partir dessas evidências, consolidaram-se os requisitos funcionais, não funcionais, as regras de negócio e os atores do sistema que orientaram a modelagem UML apresentada na Seção 4.4.

Como principal resultado dessa etapa, confirmou-se que nenhuma das ferramentas identificadas na Seção 4.1.1 atendia simultaneamente aos cinco requisitos funcionais centrais especificados para o SAF3D, representação tridimensional da estratificação vertical, simulação de cenários sucessionais, cálculo de indicadores produtivos e econômicos, edição comparativa de arranjos de plantio e geração de relatórios de apoio à decisão, o que corrobora empiricamente a lacuna científica identificada na Revisão Bibliográfica e justifica a arquitetura modular apresentada na Seção 4.5.

Da mesma forma, os quatro perfis de atores definidos na Metodologia (pesquisador/desenvolvedor, agroflorestor/agricultor, técnico especialista e formulador de políticas públicas) encontraram correspondência direta nos perfis de usuários identificados na análise das videoaulas (Seção 4.1.2 e Quadro 11), confirmando a adequação da especificação de requisitos às necessidades reais dos potenciais usuários do artefato.

4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA E BIBLIOMÉTRICA

O levantamento bibliométrico, descrito na Seção 3.4.4, abrange o período de 2019 a 2026, com 950 documentos provenientes de 305 fontes, refletindo um corpo de literatura significativo sobre SAFs, modelagem e tecnologias digitais. Apesar da quantidade expressiva de publicações, observa-se uma taxa de crescimento anual negativa de -10,35%, indicando que o número de publicações recentes tem diminuído, possivelmente devido à consolidação do tema ou a mudanças de foco em pesquisas correlatas.

O tempo médio dos documentos é de 3,56 anos, o que sugere literatura relativamente atual, e o número médio de citações por documento é 10,23, mostrando que muitos artigos têm relevância e impacto na área. O total de referências citadas é de 45.006, indicando que os estudos analisados são bem fundamentados. A grande maioria dos trabalhos são artigos (927), com pequena participação de capítulos de livros, publicações em *early access* e anais de conferências (23 documentos no total), o que reforça a confiabilidade e a disseminação do conhecimento por meio de periódicos revisados por pares.

A análise da produção científica entre 2019 e 2026 revela variações significativas no número de artigos publicados anualmente: crescimento de 101 publicações em 2019 para 139 em 2022; leve redução para 105 em 2023; recuperação para 137 em 2024 e 176 em 2025, o pico do período. Até fevereiro de 2026, 47 artigos haviam sido contabilizados, sugerindo que a tendência de crescimento pode continuar (Gráfico 1).

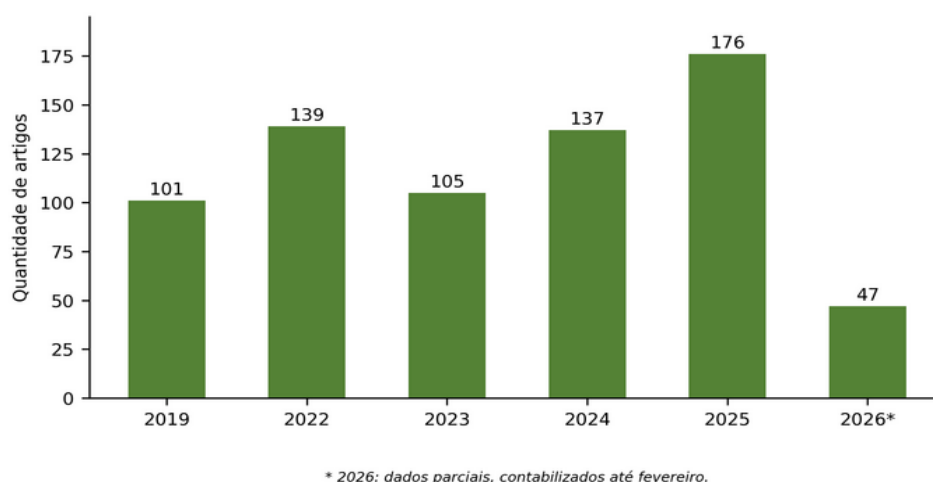


Gráfico 1. Quantidade de artigos publicados entre 2019 e 2026.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa bibliométrica.

O Gráfico 2 apresenta a distribuição anual de publicações por periódico. A revista *Agroforestry Systems* lidera o número de publicações, evidenciando seu papel central como veículo de difusão de pesquisas na área. Outros periódicos, como *Agriculture*, *Ecosystems & Environment*, *Forests* e *Plant and Soil*, apresentam crescimento constante, indicando diversificação das fontes de publicação.

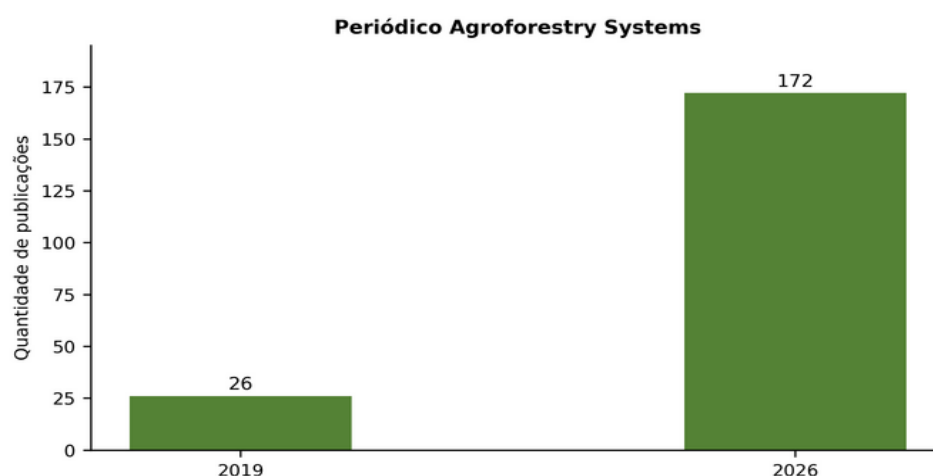


Gráfico 2. Quantidade de publicações do periódico *Agroforestry Systems*, entre 2019 e 2026.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa bibliométrica.

Os demais periódicos identificados na revisão (Agriculture, Ecosystems & Environment; Forests; Plant and Soil; Agronomy; Land; Sustainability) apresentaram crescimento qualitativamente constante ou gradual, porém sem valores numéricos discriminados na base de dados bibliométrica consultada.

O Gráfico 3 apresenta os principais autores mais citados na área, com base na revisão bibliométrica realizada. Observa-se que Jacques Avelino lidera as citações, seguido por um conjunto consistente de pesquisadores cujos trabalhos são frequentemente referenciados, o que evidencia a centralidade de determinados grupos e linhas de pesquisa.

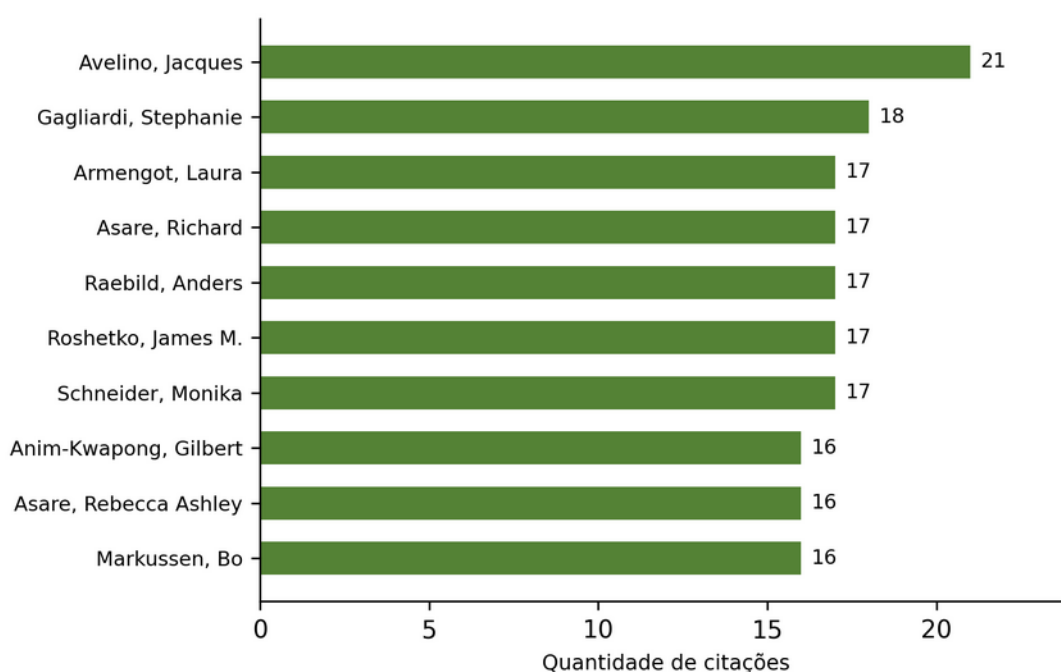


Gráfico 3. Quantidade de citações dos principais autores, entre 2019 e 2026.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa bibliométrica.

Para complementar o levantamento inicial, foi aplicada a técnica de *snowball sampling* (Seção 3.4.5), que permitiu ampliar a abrangência da revisão a partir das referências citadas nos artigos selecionados, incorporando autores e trabalhos influentes que poderiam não ter sido capturados nas buscas iniciais. Essa abordagem mapeou redes de colaboração e linhas de pesquisa consolidadas, aumentando a robustez e a abrangência da revisão de literatura que fundamenta o desenvolvimento do SAF3D.

4.4 MODELAGEM UML DO ARTEFATO SAF3D: RESULTADOS

A modelagem UML do SAF3D foi desenvolvida com foco na representação formal da estratificação vertical e na integração entre os componentes produtivos e ecológicos dos SAFs, a partir dos requisitos especificados na Seção 4.2. Essa estruturação foi realizada por meio de diferentes tipos de diagramas, conceitual, de classes, de casos de uso e de componentes, garantindo uma visão ampla, detalhada e organizada do sistema. O modelo incorporou dados provenientes de múltiplas fontes, como GIS, LiDAR e DEM, permitindo capturar com precisão as relações entre os elementos-chave dos SAFs. A Figura 8 apresenta o diagrama de modelagem conceitual do SAF3D.



Figura 8. Diagrama de modelagem conceitual do artefato SAF3D.

Fonte: elaboração própria, com base no desenvolvimento do SAF3D.

Esse modelo formaliza a estrutura dos dados e as interações entre os elementos-chave dos SAFs, orientando o desenvolvimento da aplicação web, que

utiliza tecnologias como Python, R, PostgreSQL, PHP, HTML, CSS e JavaScript.

O diagrama de classes (Figura 9) evidenciou a estruturação conceitual do sistema, destacando suas principais entidades, atributos e relacionamentos, possibilitando representar formalmente as interações entre estratos vegetais, espécies, parcelas e cenários de simulação.

Exemplo de Classes do SAF3D

Classes	Atributos	Métodos	Relacionamentos
SistemaAgroflorestal	id, nome, área, bioma	calcularCarbono(), gerarRelatório()	contém múltiplos classe Parcela
Parcela	id, tamanho, tipoSolo	medirBiomassa(), estimarProdutividade()	pertence a SistemaAgroflorestal, contém classe Estrato
Estrato	id, altura, densidade, espécies	simularCrescimento(), calcularSombreamento()	contém múltiplos classe Espécie
Espécie	id, nome, tipo (frutífera, madeira, anuais), crescimento	estimarBiomassa(), calcularSequestroCO2()	pertence a classe Estrato
Cenário	id, clima, manejo, ciclo	simularCenário(), compararResultados()	vinculado a classe SistemaFlorestal
Simulação	id, parâmetros, resultados	executar(), validar()	relacionada a classe Cenário

Figura 9. Diagrama de classes do SAF3D.

Fonte: elaboração própria.

A Figura 10 apresenta o diagrama de casos de uso do SAF3D, ilustrando as interações entre os atores do sistema, definidos na Seção 4.2, e suas funcionalidades principais, incluindo cadastro de parcelas, simulação de cenários agroflorestais e geração de relatórios de sequestro de carbono.

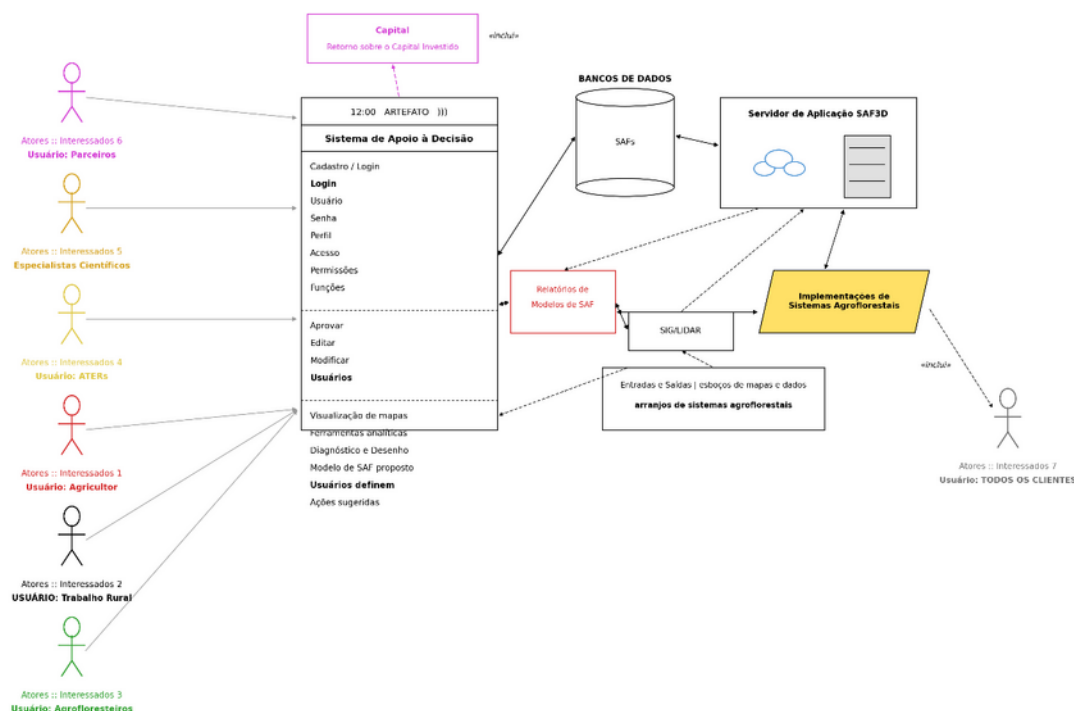


Figura 10. Diagrama de relacionamento da aplicação SAF3D com atores e casos de uso.

Fonte: elaboração própria.

A representação permite compreender de forma clara e organizada quais funcionalidades o SAF3D oferece e como cada ator se relaciona com essas funções, servindo de base para o planejamento da arquitetura apresentada na Seção 4.5.

4.5 ARQUITETURA DO SAF3D: RESULTADOS

Conforme especificado na Seção 3.5, a arquitetura do SAF3D foi concebida em módulos funcionais interdependentes. A Figura 11 apresenta o diagrama de componentes das fases de criação do artefato, evidenciando a estrutura metodológica adotada, organizada em seis fases interdependentes segundo a DSRM: identificação do problema, definição de objetivos, concepção e desenvolvimento, demonstração, avaliação e comunicação (Peffer *et al.*, 2007).

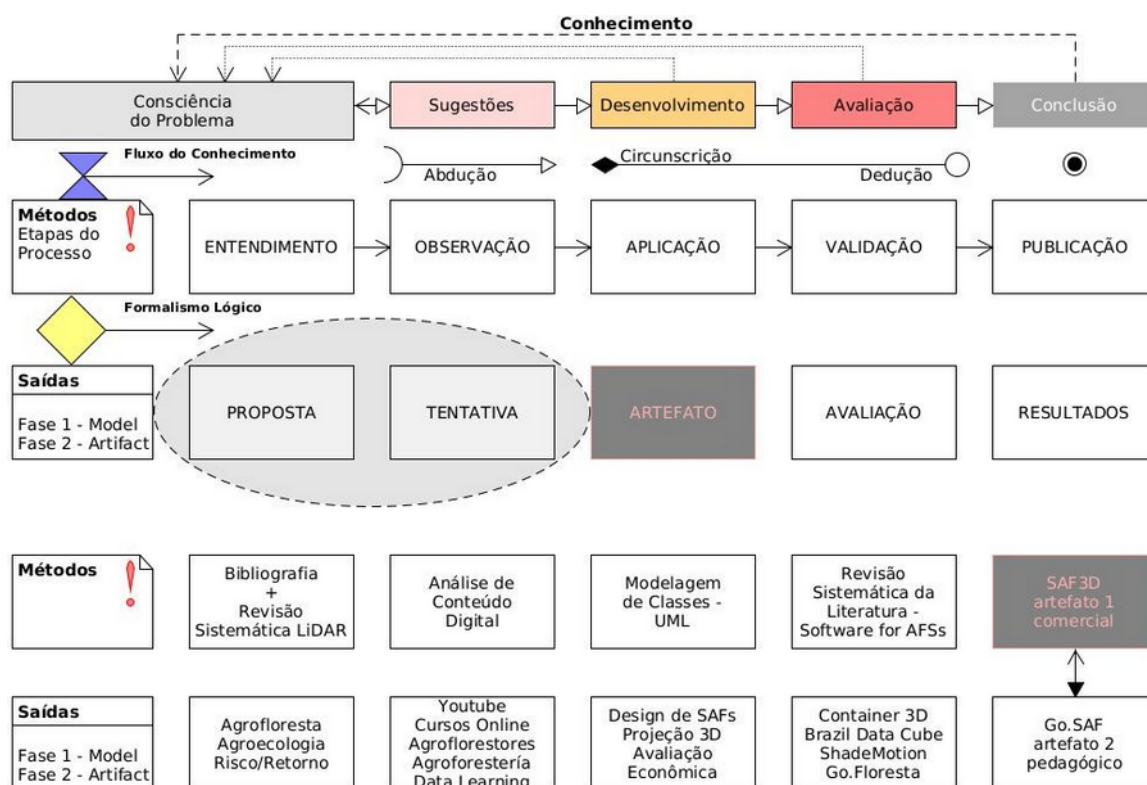


Figura 11. Diagrama de componentes das fases de criação do artefato SAF3D.

Fonte: elaboração própria, baseada em Peffers *et al.* (2007).

A aplicação dessa abordagem estruturada assegura que o desenvolvimento do SAF3D seja orientado tanto por rigor teórico quanto por relevância prática, permitindo ajustes iterativos na modelagem, integração de funcionalidades e adequação aos requisitos do usuário especificados na Seção 4.2. No contexto desta pesquisa, o SAF3D encontra-se atualmente na fase de desenvolvimento, na qual a modelagem UML desempenha papel central na construção do sistema, viabilizando a futura incorporação de tecnologias digitais tridimensionais, como LiDAR, DEM e aprendizado de máquina, módulos antecipados na arquitetura descrita na Metodologia.

A Figura 12 apresenta o diagrama de atores e do *framework* do SAF3D, evidenciando os principais usuários do sistema e as interações que cada ator estabelece com o artefato.

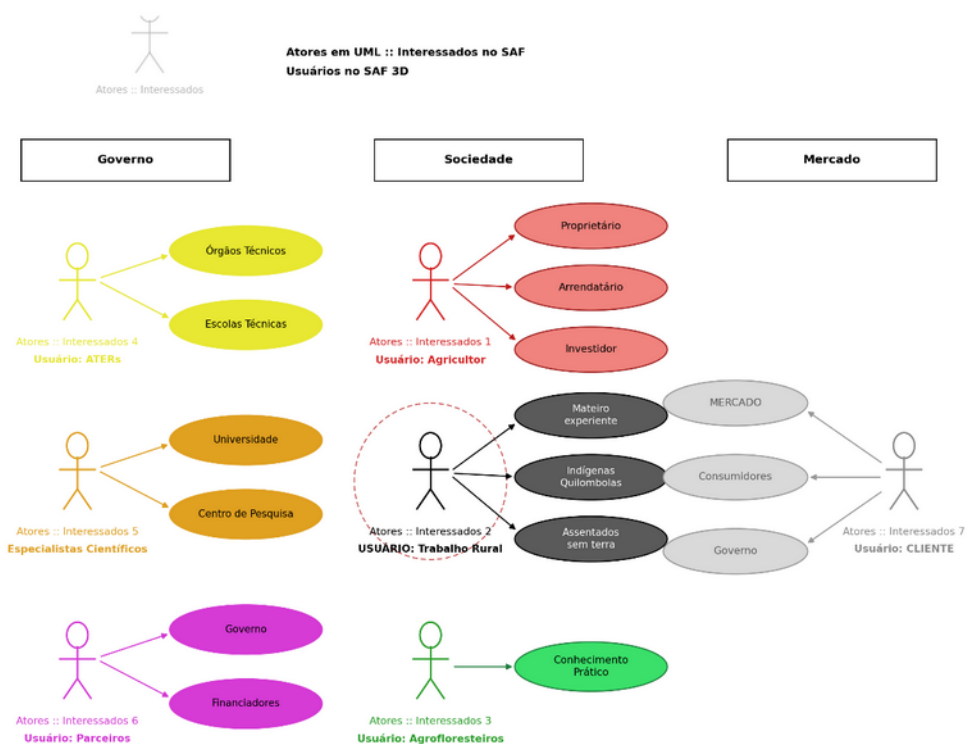


Figura 12. Diagrama de atores e framework do artefato SAF3D.

Fonte: elaboração própria.

A representação facilita a compreensão das responsabilidades e funções do sistema, ao mesmo tempo em que orienta a implementação de módulos e fluxos de dados, integrando os componentes ecológico, produtivo e tecnológico especificados na arquitetura (Seção 3.5).

Por fim, a Figura 13 apresenta o diagrama de componentes naturais e artificiais do *framework* do SAF3D, evidenciando a integração entre os elementos ecológicos do sistema agroflorestal, estratos vegetais, espécies, parcelas e suas relações ecológicas, e os módulos computacionais do artefato, *software*, simulação 3D, análise de dados e integração de tecnologias digitais como LiDAR e GIS.

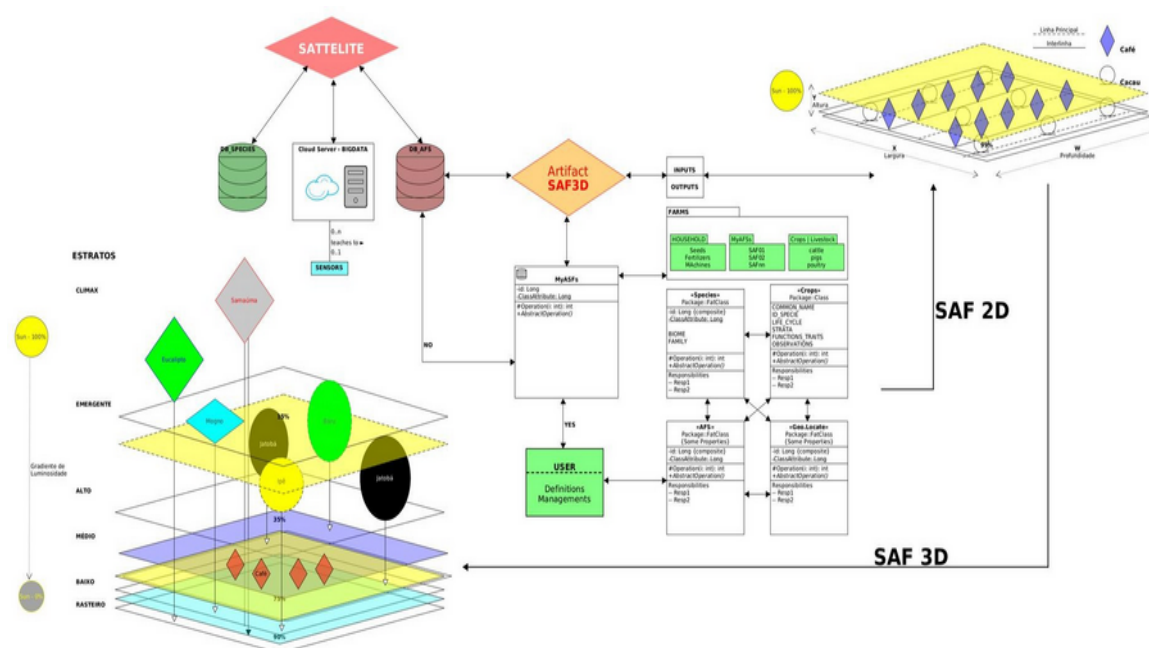


Figura 13. Diagrama de componentes naturais e artificiais do framework do artefato SAF3D.

Fonte: elaboração própria.

Essa representação demonstra como os componentes naturais e artificiais interagem, possibilitando simulações de manejo e identificação de lacunas estruturais, subsidiando intervenções estratégicas, como poda, reespaçamento ou ajuste de consórcios. O conceito de estratificação, pouco explorado em modelos anteriores, é aplicado à computação por meio de camadas por cultura combinadas à projeção de gradiente de luminosidade. Dessa forma, os resultados evidenciam que o SAF3D não é apenas um modelo conceitual, mas um artefato computacional capaz de integrar ecologia, produtividade e tecnologia digital, fornecendo suporte robusto e sistemático ao planejamento, manejo e otimização de Sistemas Agroflorestais tropicais.

4.6 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO ARTEFATO SAF3D

Em consonância com a Seção 3.6, a validação do SAF3D foi conduzida por meio de três abordagens complementares, sistematizadas no Quadro 16.

Quadro 16. Procedimentos de validação.

Tipo de Validação	Procedimento
Conceitual	Comparação com modelos internacionais e fundamentos teóricos.
Estrutural	Revisão da consistência dos diagramas UML.
Funcional	Teste de simulação de cenários hipotéticos.

Fonte: elaboração própria conforme dados da pesquisa.

A validação conceitual envolveu a comparação do modelo desenvolvido com os padrões internacionais e fundamentos teóricos identificados na Revisão Bibliográfica (Hi-sAFe, Yield-SAFE, WaNuLCAS, OpenAlea, GroIMP e APSIM), confirmando alinhamento com boas práticas e normas da área. A validação estrutural, conduzida por meio da revisão da consistência dos diagramas UML apresentados na Seção 4.4, não identificou inconsistências lógicas entre entidades, atributos e relacionamentos especificados. Por fim, a validação funcional foi conduzida por meio de testes de simulação de cenários hipotéticos, confirmando que o artefato é capaz de suportar operações típicas de planejamento agroflorestal.

Em conjunto, os resultados da validação demonstram que o SAF3D possui estrutura conceitual robusta, alinhada às exigências ecológicas, produtivas e tecnológicas dos SAFs, fornecendo base confiável para seu desenvolvimento futuro e para sua aplicação em cenários reais de manejo agroflorestal. Conforme indicado na Seção 3.6, a validação por especialistas, os testes de usabilidade com usuários finais e os estudos de caso em propriedades reais permanecem como etapas recomendadas para o desenvolvimento futuro do artefato, não tendo sido contemplados no escopo desta dissertação.

4.7 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A convergência entre as seis frentes de resultados apresentadas neste capítulo confirma a coerência metodológica descrita no Quadro 13 da Metodologia: a percepção dos agroflorestores (Seção 4.1) fundamentou o levantamento de requisitos (Seção 4.2); a revisão bibliométrica (Seção 4.3) consolidou o referencial técnico-científico incorporado à modelagem; a modelagem UML (Seção 4.4) formalizou esses requisitos em estrutura computacional; a arquitetura resultante (Seção 4.5) organizou essa estrutura em módulos interoperáveis; e a validação

(Seção 4.6) confirmou a consistência conceitual, estrutural e funcional do artefato produzido. Essa cadeia de resultados demonstra que o desenvolvimento do SAF3D respondeu, de forma rastreável, tanto ao objetivo específico I (análise da literatura e da percepção dos usuários) quanto ao objetivo específico II (elaboração da modelagem UML do artefato), estabelecendo as bases para as considerações finais apresentadas no capítulo seguinte.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa evidenciam que a digitalização dos Sistemas Agroflorestais (SAFs) biodiversos deve ser compreendida como um processo complementar e integrador, e não substitutivo, do conhecimento empírico acumulado pelos agroflorestores. A análise das percepções revelou que as tecnologias digitais são reconhecidas como instrumentos estratégicos de apoio à modelagem, ao planejamento sucessional e ao monitoramento produtivo, especialmente quando dialogam com os princípios estruturantes da sucessão agroecológica e da estratificação vertical. A adoção dessas tecnologias ocorre de forma seletiva e crítica, sendo condicionada por fatores como escolaridade, experiência prévia, complexidade do sistema e suporte institucional, além de limitações relacionadas à infraestrutura e à curva de aprendizado.

Nesse contexto, o desenvolvimento do artefato SAF3D representa uma contribuição científica e tecnológica concreta para a operacionalização dessa integração. Estruturado a partir da metodologia Design Science Research (DSR) e fundamentado na modelagem conceitual em UML, o SAF3D consolidou-se como um sistema computacional tridimensional capaz de representar a complexidade ecológica e produtiva dos SAFs tropicais. A integração de dados como GIS, LiDAR e Modelos Digitais de Elevação (DEM) permitiu simular a estratificação vertical, identificar lacunas estruturais, otimizar consórcios de espécies e avaliar cenários de manejo com maior precisão do que abordagens bidimensionais. A especificação de requisitos funcionais, não funcionais e atores do sistema, formalizada a partir das evidências qualitativas e bibliométricas, orientou diretamente a modelagem UML e a arquitetura modular do artefato — organizada nos módulos ecológico, produtivo, econômico, de visualização tridimensional, de banco de dados e de inteligência artificial —, assegurando rastreabilidade entre as necessidades identificadas e a solução computacional desenvolvida. A validação conceitual, estrutural e funcional confirmou a consistência e aplicabilidade do artefato como ferramenta de apoio à tomada de decisão.

A convergência entre as percepções dos agroflorestores e a modelagem computacional do SAF3D demonstra que soluções digitais eficazes são aquelas que respeitam a lógica ecológica dos sistemas e fortalecem práticas baseadas na

natureza (NbS), promovendo sustentabilidade, resiliência e eficiência produtiva. Ao mesmo tempo, as limitações identificadas, como dependência de dados de qualidade, exigência computacional elevada, ausência de validação empírica de longo prazo e necessidade de maior integração com variáveis socioeconômicas, indicam que a consolidação plena dessas ferramentas demanda avanços técnicos, ampliação da infraestrutura digital rural e estratégias de capacitação.

De forma integrada, os resultados apresentados demonstram que a inovação digital na agroecologia deve ser orientada por uma perspectiva sistêmica e participativa, capaz de articular ciência ecológica, engenharia de software e saberes tradicionais. O SAF3D emerge, como um modelo replicável de integração entre tecnologia e agroecologia, oferecendo bases sólidas para o planejamento, manejo e avaliação da sustentabilidade de SAFs tropicais. Seu aprimoramento futuro, com incorporação de dados em tempo real, inteligência artificial, validação de campo e expansão para dimensões socioeconômicas, poderá consolidá-lo como instrumento estratégico para a transição agroecológica, o fortalecimento da agricultura familiar e a promoção de sistemas agroflorestais mais produtivos, resilientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, F. *et al.* Agroecologia e sistemas agroflorestais no Brasil: tendências e perspectivas. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 16, n. 2, p. 45–63, 2021.
- ANDRADE, L. F.; FERRAZ ALMEIDA, R. Perfil dos produtores da agricultura familiar e uso dos critérios de Environmental, Social and Governance [ESG] na Região Baixo Sul, Bahia. **Revista Extensão & Cidadania**, [S. l.], v. 10, n. 18, p. 5–23, 2022. DOI: 10.22481/recuesb.v10i18.10468. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/recuesb/article/view/10468>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- ARCO-VERDE, M.F., AMARO, G. Cálculo de indicadores financeiros para sistemas agroflorestais. Embrapa Roraima, 57. 2014. Acesso em: 11 jul. 2026.
- ARANGURÍ, M. *et al.* Digital Literacy and Technology Adoption in Agriculture: A Systematic Review of Factors and Strategies. *AgriEngineering*, 7(9), 296. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7090296>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- BASS, L.; CLEMENTS, P.; KAZMAN, R. *Software Architecture in Practice*. 3. ed. Boston: Addison-Wesley, 2012. ISBN 978-0-321-81573-6.
- BEER, J. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. *Agroforestry Systems*, v. 5, n. 1, p. 3–13, 1987. DOI: 10.1007/BF00046410. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00046410>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. *The Unified Modeling Language User Guide*. Boston: Addison-Wesley, 1999.
- CARVALHO, R. D.; SANTOS, R. B. Inovação, estratégias e ferramentas de gestão para o controle eficiente no agronegócio. 2025. *REMUNOM*, v. 19, n. 03, p. 1–16. Disponível em: <https://doi.org/10.61164/078nhm63>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- DE SWAEF, T. *et al.* Agroforlight: 3D light distribution modelling in agroforestry systems using high-resolution tree LiDAR scans. *Agroforestry Systems*, v. 99, n. 5, p. 111, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01216-6>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- DUPRAZ, C. *et al.* Hi-sAFé: a 3D agroforestry model for integrating dynamic tree–crop interactions. *Sustainability*, v. 11, n. 8, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e sistemas agroflorestais biodiversos*. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Agroforestry for landscape restoration: exploring the potential of agroforestry to*

enhance the sustainability and resilience of degraded landscapes. Rome: FAO, 2018. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/CA1719EN/>. Acesso em: 11 jul. 2026.

FELIPE, R. T. A. *et al.* Sistemas Agroflorestais Agroecológicos: Trajetórias, Perspectivas e Desafios nos Territórios do Brasil. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 18, n. 1, p. 9-43, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33240/rba.v18i1.23702>. Acesso em: 11 jul. 2026.

FERREIRA, K. R. *et al.* Earth Observation Data Cubes for Brazil: Requirements, Methodology and Products. *Remote Sensing*, 12(24), 4033, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12244033>. Acesso em: 11 jul. 2026.

FIELDING, R. T. Architectural styles and the design of network-based software architectures. University of California, Irvine, 2000. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/fc2d064044b971dda476dfb429a2b344/1>. Acesso em: 11 jul. 2026

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GOODMAN, L. A. (1961) Snowball Sampling. *Annals of Mathematical Statistics*, 32, 148-170. Disponível em: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177705148>. Acesso em: 11 jul. 2026.

GOSME, M. *et al.* AgroforestryAdvice: a decision support tool combining heterogeneous knowledge resources for tree species selection in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, v. 99, n. 5, p. 130, 6 jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01208-6>. Acesso em: 11 jul. 2026.

HEMMERLING, R.; KNIEMEYER, O.; LANWERT, D.; KURTH, W.; BUCK-SORLIN, G. The rule-based language XL and the modelling environment GroIMP illustrated with simulated tree competition. *Functional Plant Biology*, v. 35, n. 10, p. 739–750, 2008. DOI: 10.1071/FP08052. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/FP08052>. Acesso em: 11 jul. 2026.

HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. Design science in information systems research. *MIS Quarterly*, v. 28, n. 1, p. 75–105, 2004. DOI: 10.2307/25148625. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/25148625>. Acesso em: 11 jul. 2026.

HOLZWORTH, D. P. *et al.* APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, v. 62, p. 327–350, 2014. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.07.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>. Acesso em: 11 jul. 2026.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the

Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 11 jul. 2026.

KAIM, A.; CORD, A. F.; VOLK, M. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation. *Environmental Modelling & Software*, v. 105, p. 79–93, 2018. DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.03.031. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.031>. Acesso em: 11 jul. 2026.

KANMEGNE TAMGA, D.; LATIFI, H.; ULLMANN, T.; BAUMHAUER, R.; BAYALA, J.; THIEL, M. Estimation of aboveground biomass in agroforestry systems over three climatic regions in West Africa using Sentinel-1, Sentinel-2, ALOS, and GEDI data. *Sensors*, v. 23, n. 1, p. 349, 2022. DOI: 10.3390/s23010349. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23010349>. Acesso em: 11 jul. 2026.

LAINO, D. *et al.* 3DFin: a software for automated 3D forest inventories from terrestrial point clouds. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, v. 97, n. 4, p. 479–496, 9 ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpae020>. Acesso em: 11 jul. 2026.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária com Vistas ao Desenvolvimento Sustentável (2020–2030) – Plano ABC+. Brasília, DF: MAPA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais>. Acesso em: 11 jul. 2026.

MOHER, D., LIBERATI, A., TETZLAFF, J., ALTMAN, D. G. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>. Acesso em: 11 jul. 2026.

NAIR, P. K. R. *An Introduction to Agroforestry*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993.

NAIR, P. K. R. Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, v. 3, p. 97–128, 1985. DOI: 10.1007/BF00122638. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00122638>. Acesso em: 11 jul. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>. Acesso em: 11 jul. 2026.

PADOVAN, M. P.; NASCIMENTO, J. S.; PEREIRA, Z. V.; ALVES, J. C.; RAMOS, F. S. Estado da arte de sistemas agroflorestais em bases agroecológicas em Mato Grosso do Sul, região Centro-Oeste do Brasil. *Cadernos de Agroecologia*, v. 11, n. 2,

2016. Disponível em: <https://revista.aba-agroecologia.org.br/cad/article/view/21487>. Acesso em: 11 jul. 2026.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302. Disponível em: <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>. Acesso em: 11 jul. 2026.

PRADAL, C.; DUFOUR-KOWALSKI, S.; BOUDON, F.; FOURNIER, C.; GODIN, C. OpenAlea: a visual programming and component-based software platform for plant modelling. *Functional Plant Biology*, v. 35, n. 10, p. 751–760, 2008. DOI: 10.1071/FP08084. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/FP08084>. Acesso em: 11 jul. 2026.

ROCHA, E. B. G. Go.Floresta: Game educacional agroflorestal para ensinar sucessão ecológica. 2022. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/45667>. Acesso em: 11 jul. 2026.

SEMADESC – SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE, DESENVOLVIMENTO, CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Agroflorestar MS – Carbono Neutro. Campo Grande: Governo do Estado de Mato Grosso do Sul, 2023. Disponível em: <https://www.semadesc.ms.gov.br/programas-e-projetos/agroflorestar-ms-carbono-neutro/>. Acesso em: 11 jul. 2026.

SINCLAIR, F. L. A general classification of agroforestry practice. *Agroforestry Systems*, v. 46, n. 2, p. 161–180, 1999. DOI: 10.1023/A:1006278928088. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1006278928088>. Acesso em: 11 jul. 2026.

SOMARRIBA, E. Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems*, v. 19, p. 233–240, 1992. DOI: 10.1007/BF00118781. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00118781>. Acesso em: 11 jul. 2026.

SOMMERVILLE, I. *Software Engineering*. 10. ed. Boston: Pearson, 2015.

TAGARAKIS, A. C.; BENOS, L.; KYRIAKARAKOS, G. et al. Digital twins in agriculture and forestry: a review. *Sensors*, v. 24, n. 10, p. 3117, 2024. DOI: 10.3390/s24103117. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s24103117>. Acesso em: 11 jul. 2026.

TROCHTA, J. *et al.* 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. *PLOS ONE*, v. 12, n. 5, p. e0176871, 4 maio 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176871>. Acesso em: 11 jul. 2026.

TSCHARNTKE, T.; CLOUGH, Y.; WANGER, T. C.; JACKSON, L.; MOTZKE, I.; PERFECTO, I.; VANDERMEER, J.; WHITBREAD, A. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation*, v. 151, n. 1, p. 53–59, 2012. DOI: 10.1016/j.biocon.2012.01.068. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.01.068>. Acesso em: 11 jul. 2026.

VAN NOORDWIJK, M.; LUSIANA, B. WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, v. 43, p. 217–242, 1999. DOI: 10.1023/A:1026417120254. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1026417120254>. Acesso em: 11 jul. 2026.

WEZEL, A.; GEMMILL HERREN, B.; BEZNER KERR, R.; BARRIOS, E.; RODRIGUES GONÇALVES, A. L.; SINCLAIR, F. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 40, art. 40, 2020. DOI: 10.1007/s13593-020-00646-z. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z>. Acesso em: 11 jul. 2026.

WOHLIN, C. Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. In: PROCEEDINGS OF THE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVALUATION AND ASSESSMENT IN SOFTWARE ENGINEERING (EASE '14), 2014, Londres. Anais \[...\]. Nova York: ACM, 2014. Artigo 38, p. 1–10. DOI: 10.1145/2601248.2601268. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>. Acesso em: 11 jul. 2026.

WOLFERT, S. *et al.* Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, v. 153, p. 69–80, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X16303754>. Acesso em: 11 jul. 2026

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press, 1987.

YOUNG, A. *Agroforestry for Soil Management*. 2. ed. Wallingford: CAB International, 1997.

ANEXO I – VÍDEOS DA PESQUISA (YOUTUBE®)

Título do Vídeo	Autor	Ano de Publicação
A INTELIGÊNCIA DA FLORESTA	SEMINÁRIO FRUTO	2018
Da colonização aos sistemas de abundância, Agricultura Sintrópica segundo Ernst Götsch, parte II.	CEPEAS	2020
F4F Academy - O CACAU NA SINTROPIA: aprendendo com a abordagem de Ernst Götsch	Forests4Farming Academy	2023
Life in syntropy	Agenda Gotsch	2016
(Audiolivro) Agroflorestando o mundo de facao a trator	Da Mata	2018
Ana Primavesi participa de debate sobre biodiversidade	Ana Primavesi	2018
Sucessão Natural	Sitião Agroflorestal	2018
Episódio 2 - Escolha da área para plantio	CEPEAS	2018
Episódio 3 - Por que a Agricultura Sintrópica funciona ?	CEPEAS	2018
Episódio 4 - Técnica 1: Foco na fotossíntese	CEPEAS	2018
Episódio 6 - A Dinâmica da Sucessão Natural na Agricultura Sintrópica (Técnicas 2 e 3)	CEPEAS	2018
Episódio 8 - Capina Seletiva e Poda	CEPEAS	2018
Episódio 10 - Preparo da área para o plantio	CEPEAS	2018
Um novo design para a horta agroflorestal, o canteiro ondulado!	Rafael Duckur	2018
Agrofloresta - Vê Quem Planta - com Fabiana Peneireiro	Agrosintropia	2020
Agricultura sintrópica. Como escolher as espécies em oito passos.	CEPEAS	2020

Episódio 1- Florestas, a Pele do Planeta	CEPEAS	2020
Episódio 7 - Como concentrar energia e gerar biomassa de forma eficiente	CEPEAS	2020
Episódio 9 - Tentar enxergar o que cada ser está fazendo de bom.	CEPEAS	2020
Água se planta 2 - Episódio 4 - Como manejar árvores plantadas em alta densidade.	CEPEAS	2020
Aula 1 - Negócios Agroflorestais	Maurício Hoffmann	2021
Aula 2 - Base de Mercado em Sistemas Agroflorestais	Maurício Hoffmann - Negócios Agroflorestais	2021
Aula 3 - Estratégia Financeira em Negócios Agroflorestais	Maurício Hoffmann - Negócios Agroflorestais	2021
Aula 4 - Os Maiores Riscos em Negócios Agroflorestais	Maurício Hoffmann - Negócios Agroflorestais	2021
Negócios Agroflorestais - AULA 4 - Estratégia em Negócios Agroflorestais. Abril de 2021	Maurício Hoffmann - Negócios Agroflorestais	2021
Agricultura sintrópica na Caatinga. Episódio 3 - Matriz fotossintética - parte 1.	CEPEAS	2021
Episódio 5 - Técnica 1: Foco na fotossíntese (Parte 2)	CEPEAS	2021
Agricultor Nelson Araújo recupera área degradada em Poções na Bahia, usando Sistema Agroflorestal	Experimentador do Sertão	2021
ÁREA 01 - Recuperação de Área Degradada na Caatinga Implantando Agricultura Florestal	CEDASB	2021
Como sombrear o café desde o início.	CEPEAS	2022
Agrofloresta no Semiárido: Uma visão de fartura e abundância! Aula #53	Lucas Machado	2023
A REGENERAÇÃO PELO USO - EPISÓDIO 1 - Fotossíntese, planejando a viagem.	CEPEAS	2023
Agricultura sintrópica - Como calcular	CEPEAS	2023

o espaçamento do nosso carro chefe - PARTE 1.		
Agricultura sintrópica - Como calcular o espaçamento do nosso carro chefe - PARTE 2.	CEPEAS	2023
Como produzir a sombra adequada para nossas plantas - um método simples e prático.	CEPEAS	2023
Coringa Agrofloresta: Estrato não é altura	CoringaAgrofloresta	2023
Nelson Araújo-Como era nossa Caatinga antigamente? O que é fotossíntese? Impressões de um camponês	Experimentador do Sertão	2023
Aula #107/ O CARRO-CHEFE NA AGROFLORESTA (Ecologia + Mercado + Território + Gestão)	Lucas Machado	2024
Agrofloresta para quem vai trabalhar sozinho #AULA86	Lucas Machado	2025
Agricultura sintrópica na Caatinga. Episódio 4 - Matriz fotossintética - Parte 2	CEPEAS	2025
A REGENERAÇÃO PELO USO - EPISÓDIO 6 - A poda e o destope, fundamentos da frutificação.	CEPEAS	2025
Gramíneas da savana africana: uma ferramenta sintrópica	CEPEAS	2025
Como manejar os estratos. Agricultura Sintrópica.	CEPEAS	2025
Biomassa, quanto mais, melhor???	CEPEAS	2025
Observação como ferramenta chave no campo	abrYgo	2025