

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programas de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Charles de Oliveira Fonseca

**MODELAGEM DE USO DA TERRA E CENÁRIOS DE RESTAURAÇÃO DE MATA
ATLÂNTICA: o entorno do Parque Estadual Serra do Brigadeiro/MG**

Belo Horizonte
2024

Charles de Oliveira Fonseca

**MODELAGEM DE USO DA TERRA E CENÁRIOS DE RESTAURAÇÃO DE MATA
ATLÂNTICA: o entorno do Parque Estadual Serra do Brigadeiro/MG**

Tese apresentada ao programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Análise e Modelagem em Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Fernando Ferreira Lobo

Coorientadora: Profa. Dra. Sônia Maria Carvalho Ribeiro

Belo Horizonte
2024

F676m
2024

Fonseca, Charles de Oliveira.

Modelagem de uso da terra e cenários de restauração de Mata Atlântica [manuscrito] : o entorno do Parque Estadual Serra do Brigadeiro/MG / Charles de Oliveira Fonseca. – 2024.

149 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Carlos Fernando Ferreira Lobo.

Co-orientadora: Sônia Maria Carvalho Ribeiro.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Bibliografia: f. 138-149.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Paisagem – Proteção – Teses. 3. Serviços ecossistêmicos – Teses. 4. Floresta – Restauração – Teses. I. Lobo, Carlos. II. Carvalho-Ribeiro, Sônia Maria. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Modelagem de uso da terra e cenários de restauração de mata atlântica: o entorno do Parque Estadual Serra do Brigadeiro/MG"

Charles de Oliveira Fonseca

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **30 de agosto de 2024**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Carlos Fernando Ferreira Lobo - Orientador

Universidade Federal de Minas Gerais

Sônia Maria Carvalho Ribeiro

Universidade Federal de Minas Gerais

Diego Rodrigues Macedo

Universidade Federal de Minas Gerais

Marcelo Antônio Nero

Universidade Federal de Minas Gerais

Luiz Eduardo Panisset Travassos

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Gabriel Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei

Belo Horizonte, 02 de setembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Antonio Nero, Professor do Magistério Superior**, em 02/09/2024, às 09:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Fernando Ferreira Lobo, Professor do Magistério Superior**, em 02/09/2024, às 09:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo Panisset Travassos, Usuário Externo**, em 02/09/2024, às 10:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sonia Maria Carvalho Ribeiro, Professora do Magistério Superior**, em 02/09/2024, às 13:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diego Rodrigues Macedo, Professor do Magistério Superior**, em 02/09/2024, às 15:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Pereira, Usuário Externo**, em 16/10/2024, às 10:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3512588 e o código CRC 22CD49A3.

RESUMO

Este estudo analisa a dinâmica de uso da terra e propõe cenários de restauração florestal no entorno do Parque Estadual Serra do Brigadeiro (PESB), na Zona da Mata mineira, Brasil. A pesquisa utilizou uma abordagem metodológica em três etapas: diagnóstico da paisagem, modelagem determinística e modelagem probabilística. A primeira etapa abrangeu os anos de 1985, 2005 e 2022, utilizando dados do projeto MapBiomias para avaliar métricas de área, forma, conexão e diversidade das manchas florestais. A segunda etapa, modelagem determinística, foi realizada através da Análise Hierárquica de Processos - Combinação Linear Ponderada (AHP-CLP), identificando áreas prioritárias para a restauração ativa. A terceira etapa aplicou a modelagem dinâmica probabilística para projetar cenários de uso da terra até 2050, considerando a restauração passiva de manchas florestais. Os resultados do diagnóstico demonstraram alta fragmentação da Mata Atlântica nas propriedades rurais ao redor do PESB. A modelagem determinística identificou 5.801 hectares (3,6% da área de estudo) como prioritários para restauração ativa, superando o déficit de 2.273 hectares (1,4% da área de estudo) estabelecido pelo Código Florestal. Na modelagem probabilística, o cenário preditivo, projetado sob condições atuais de uso da terra, indicou uma maior presença do bioma em 2050, com 3.851 hectares restaurados. Já o cenário exploratório, que considerou como um *input* as áreas prioritárias da modelagem determinística, projetou 12.815 hectares restaurados para 2050. A análise de custo de oportunidade revelou que a restauração florestal é mais vantajosa economicamente do que a manutenção de pastagens em ambos cenários. No modelo preditivo, a pastagem poderia gerar U\$ 280.072,00 anuais, enquanto a restauração e venda de créditos de carbono poderiam render U\$ 1.134.294,00 anuais. No cenário exploratório, o aluguel da pastagem renderia U\$ 932.000,00 anuais. Já sua conversão em floresta traria uma renda anual de U\$ 3.774.600,00, quatro vezes maior que o aluguel de pastagens. Conclui-se que a restauração florestal no entorno do PESB pode promover a sustentabilidade ambiental e socioeconômica da região, alinhando-se às metas globais de recuperação de 12 milhões de hectares de florestas até 2030, conforme o Acordo de Paris e a Década da Restauração de Ecossistemas da ONU.

Palavras-chave: métricas da paisagem; modelagens espaciais; serviços ecossistêmicos; restauração florestal.

ABSTRACT

This study analyzes the dynamics of land use and proposes forest restoration scenarios in the surroundings of the Serra do Brigadeiro State Park (PESB), in the Zona da Mata region of Minas Gerais, Brazil. The research used a three-stage methodological approach: landscape diagnosis, deterministic modeling and probabilistic modeling. The first stage covered the years 1985, 2005 and 2022, using data from the MapBiomass project to evaluate metrics of area, shape, connection and diversity of forest patches. The second stage, deterministic modeling, was carried out using Hierarchical Process Analysis - Weighted Linear Combination (AHP-CLP), identifying priority areas for active restoration. The third stage applied probabilistic dynamic modeling to project land use scenarios until 2050, considering the passive restoration of forest patches. The results of the diagnosis showed high fragmentation of the Atlantic Forest on the rural properties around the PESB. Deterministic modeling identified 5,801 hectares (3.6% of the study area) as priorities for active restoration, exceeding the deficit of 2,273 hectares (1.4% of the study area) established by the Forest Code. In probabilistic modeling, the predictive scenario, projected under current land use conditions, indicated a greater presence of the biome in 2050, with 3,851 hectares restored. The exploratory scenario, which considered the priority areas from the deterministic modeling as an input, projected 12,815 hectares restored by 2050. The opportunity cost analysis revealed that forest restoration is more economically advantageous than maintaining pastures in both scenarios. In the predictive model, pasture could generate US\$ 280.072,00 per year, while restoration and the sale of carbon credits could yield US\$ 1.134.294,00 per year. In the exploratory scenario, renting out the pasture would yield US\$ 932.000,00 per year. Converting it into forest, on the other hand, would bring in an annual income of US\$ 3.774.600,00, four times higher than pasture rental. The conclusion is that forest restoration around the PESB can promote environmental and socio-economic sustainability in the region, in line with the global goals of restoring 12 million hectares of forest by 2030, in accordance with the Paris Agreement and the UN Decade of Ecosystem Restoration.

Keywords: landscape metrics; spatial modeling; ecosystem services; forest restoration.

RESUMEN

Este estudio analiza la dinámica de uso del suelo y propone escenarios de restauración forestal en el entorno del Parque Estadual da Serra do Brigadeiro (PESB), en la región de la Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil. La investigación utilizó un enfoque metodológico en tres etapas: diagnóstico del paisaje, modelación determinista y modelación probabilística. La primera etapa abarcó los años 1985, 2005 y 2022, mediante el empleo de los datos del proyecto MapBiomás de manera a evaluar las métricas de área, forma, conexión y diversidad de las manchas forestales. La segunda etapa, de modelación determinista, se llevó a cabo mediante el Análisis Jerárquico de Procesos - Combinación Lineal Ponderada (AHP-CLP), identificando las áreas prioritarias para la restauración activa. En la tercera etapa se aplicó la modelación dinámica probabilística para proyectar escenarios de uso del suelo hasta 2050, considerando la restauración pasiva de las manchas forestales. Los resultados del diagnóstico demostraron una elevada fragmentación del Bosque Atlántico en las propiedades rurales alrededor del PESB. La modelación determinista identificó 5.801 hectáreas (3,6% del área de estudio) como prioritarias para la restauración activa, superando el déficit de 2.273 hectáreas (1,4% del área de estudio) establecido por el Código Forestal. En la modelación probabilística, el escenario predictivo, proyectado en las condiciones actuales de uso del suelo, indicó una mayor presencia del bioma en 2050, con 3.851 hectáreas restauradas. El escenario exploratorio, que consideraba las áreas prioritarias de la modelación determinista como input, proyectaba 12.815 hectáreas restauradas en 2050. El análisis del coste de oportunidad reveló que la restauración forestal es más beneficiosa económicamente que el mantenimiento de los pastos en ambos escenarios. En el modelo predictivo, los pastos podrían generar U\$ 280.072,00 al año, mientras que la restauración y la venta de créditos de carbono podrían producir U\$ 1.134.294,00 al año. En el escenario exploratorio, el alquiler de los pastos generaría U\$ 932.000,00 al año. La conversión en bosque, en cambio, reportaría unos ingresos anuales de U\$ 3.774.600,00, cuatro veces más que el alquiler de los pastos. La conclusión es que la restauración forestal en torno al PESB puede promover la sostenibilidad ambiental y socioeconómica de la región, en consonancia con los objetivos mundiales de restaurar 12 millones de hectáreas de bosque para 2030, de conformidad con el Acuerdo de París y el Decenio de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas.

Palabras clave: métrica de paisaje; modelación espacial; servicios ecosistémicos; restauración forestal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Organograma da estrutura de pesquisa	24
Figura 2: Localização, divisões municipais e hidrografia da área de estudo	59
Figura 3: Organograma de etapas, métodos e resultados da pesquisa.....	64
Figura 4: Estruturação do nível hierárquico AHP	68
Figura 5: Principais usos da terra no ano de 2022	94
Figura 6: Distribuição da formações florestais na área de estudo 2022	95
Figura 7: Distância dos corpos hídricos	101
Figura 8: Distância das manchas florestais	103
Figura 9: Erodibilidade do solo	105
Figura 10: Fator LS da área de estudo	107
Figura 11: Taxa de carbono no solo	109
Figura 12: Modelo com melhores áreas para restauração	111
Figura 13: Modelo conceitual.....	113
Figura 14: Transição de outros usos para floresta de 1985 a 20005.....	115
Figura 15: Localização da área ampliada para visualização em detalhes das restaurações ...	128
Figura 16: Cenários tendencias de recorte da área de estudo	129
Figura 17: Cenários exploratórios de recorte da área de estudo.....	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Base de dados	61
Quadro 2: Reclassificação dos usos da terra para 1985, 2005 e 2022.....	63
Quadro 3: métricas da paisagem aplicadas na área de pesquisa.....	66
Quadro 4: Escala fundamental de comparação.....	69

Quadro 5: Matriz de comparação pareada	70
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índices Randômicos de acordo com os números de critérios	71
Tabela 2: Métricas da paisagem 1985	84
Tabela 3: Métricas da paisagem 2005	85
Tabela 4: Métricas da paisagem 2022	85
Tabela 5: Resultados da matriz de comparação pareada	98
Tabela 6: Teste de Cramer	122
Tabela 7: Comparativo de cenários	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Área de uso da terra entre os anos 1985, 2005 e 2022 no entorno do PESB	93
Gráfico 2: Peso de evidência distância da UC	117
Gráfico 3: Peso de evidência da declividade	118
Gráfico 4: Peso de evidência distância da drenagem	119
Gráfico 5: Peso de evidência distância das estradas	120
Gráfico 6: Peso de evidência de manchas florestais	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS:

ABC	Agricultura de Baixo Carbono
ABMs	Modelos Baseados em Agentes
AHP	Análise Hierárquica de Processos
AMC	Análise Multicritério
ANA	Agência Nacional de Águas
APP	Área de Proteção Permanente
AREA_MN	Área média
AREA_SD	Desvio padrão em relação a área média
CA	Área Total
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CC	Comando e Controle
CFC	Clorofluorcarbono
CLP	Combinação Linear Ponderada
CO ₂ e	Carbono Equivalente
COHESION	Índice de conectividade estrutural
COP	Conferências das Partes
CPR	Cédula de Produtor Rural
CPR-V	Cédula de Produto Rural Verde
CSR	Centro de Sensoriamento Remoto
EGO	Ambiente para Objetos de Geoprocessamento
EMPRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENN_MN	Média das distâncias dos vizinhos
ENN_SD	Desvio padrão da média dos vizinhos
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global
Ha	Hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE-SISEMA	Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IEF	Instituto Estadual de Florestas
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas

IGC	Instituto de Geociências
IPBES	Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IR	Índice Randômico
LS	Inclinação do comprimento
MDE	Modelo Digital de Elevação
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PESB	Parque Estadual Serra do Brigadeiro
PFNMs	Produtos Florestais Não Madeireiros
Planaveg	Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa
PLAND	Porcentagem da paisagem
PN	Número de manchas
PNPSA	Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PR	Riqueza de classes
PRN	Potencial de Regeneração Natural
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais
RC	Razão de Consistência
REDD	Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação florestal
RL	Reserva Legal
SAFs	Sistemas Agroflorestais
SE	Serviços Ecossistêmicos
SHAPE_MN	Forma média
SHDI	Índice de diversidade de Shannon
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
STEEPV	Social, Tecnologia, Economia, Ecologia, Política e Valores
UC	Unidade de conservação
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UNFCCC	Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
λ MAX	Autovalor

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	14
1.1. Justificativa:	21
1.2. Resumo das etapas da pesquisa.....	22
2 – BASES TEÓRICAS E CONCEITUAIS.....	27
2.1. As mudanças climáticas e as consequências ambientais	27
2.2. A Década da Restauração de Ecossistemas	31
2.3. A produção agropecuária Brasileira e a questão ambiental	33
2.4. Serviços ecossistêmicos	36
2.5. Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)	37
2.5.1. Programa Produtor de Água	39
2.5.2. Crédito de Carbono	41
2.6. Composições da paisagem	47
2.7. Características essenciais dos modelos	49
2.8. Cenários e perspectivas para a paisagem na modelagem.....	50
2.9. Modelagem determinística AHP-CLP	52
2.10. Modelagem dinâmica dos usos da terra.....	53
2.11. Dinâmica EGO.....	55
3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS: ÁREA DE ESTUDO, BASE DE DADOS E MÉTODOS	58
3.1. Área de estudo	58
3.2. Base de dados.....	61
3.3. Métodos	63
3.3.1. Etapa 1: Métricas da paisagem aplicadas ao diagnóstico ambiental da área de pesquisa	65
3.3.2. Etapa 2: Método AHP-CLP para priorização de áreas restauradas.....	67

3.3.3. Etapa 3: Procedimentos para a modelagem dinâmica	74
3.3.4. Custo de oportunidade.....	82
4– RESULTADOS: ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO	83
4.1. Diagnóstico da paisagem	83
4.1.2. Análise espacial integrada das classes de uso da terra	92
4.2. Resultados e análises da modelagem determinística	97
4.2.1. AHP-CLP	97
4.2.2 Análise das variáveis espaciais	99
4.2.3. Modelo de áreas prioritárias à restauração ativa	110
4.3. Resultados da modelagem dinâmica	112
4.3.1. Matriz de transição	114
4.3.2. Calibração	116
4.3.3. Validação.....	122
4.3.4. Projeções da modelagem: cenários preditivo e exploratório para a restauração...	124
4.4. Custo de oportunidade e mercado de carbono	133
5- CONSIDERAÇÕES FINAIS	136
REFERÊNCIAS	139

1 - INTRODUÇÃO

O antropoceno é um período de grandes mudanças na organização espacial no ecúmeno terrestre. Registraram-se desde os primeiros domínios de cultivos agrícolas, a Revolução Industrial e o rápido desenvolvimento tecnológico. As conquistas aceleradas desse período trouxeram também consequências ambientais negativas percebidas a nível global, como as mudanças climáticas e perdas ecossistêmicas (Numata *et al.*, 2011). Diante disso, as organizações mundiais buscam formas de mitigações, adaptações e novos instrumentos para o combate à crise ambiental, nomeadamente o desflorestamento (Assunção; Gandour; Rocha, 2015; Oliveira *et al.*, 2013; Rosano-Peña *et al.*, 2014). Como resposta, a Organização das Nações Unidas (ONU), por meio do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), lançaram a chamada Década da Restauração de Ecossistemas (2021 a 2030). O objetivo é a restauração dos ecossistemas em territórios continentais e oceânicos, já que a manutenção das formações naturais existentes não promoverá as mudanças necessárias para um futuro equilibrado, no contexto de alterações climáticas globais (UN, 2019).

Ao mesmo tempo, a restauração ainda contribui positivamente com compromissos os assumidos no Acordo de Paris, de se tentar recuperar o déficit florestal de 12 milhões de hectares até 2030. Compromisso este institucionalizado a nível nacional, em 2017, pelo Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg). Além disso, o Código Florestal, estabelecido na Lei 12.651/2012 (Brasil, 2012), também prevê áreas específicas de formações naturais que devem ser recuperadas. As propositivas de restauração vão ao encontro diretamente dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, 13 e 15 e indiretamente aos ODS 1, 2, 8 e 12. Também aos alinhamentos das diretrizes de órgãos independentes, como o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES). Esses institutos, de forma ampla, incentivam e promovem, por meio da ciência, mudanças de paradigmas nos campos social, econômico, ambientais, tecnológico, político e valores, conhecidos na literatura como STEEPV (IPBES, 2016a; Loveridge, 2016). Os esforços são direcionados à obtenção de ambientes resilientes, que possibilitem práticas agropecuárias mais sustentáveis, redução de desigualdades sociais e contenção de danos ecossistêmicos.

No Brasil, as perdas ecossistêmicas estão em contínuo aumento, sobretudo ocasionadas pelas perdas florestais (Carvalho-Ribeiro; Lovett, 2009; Oliveira *et al.*, 2013; Rajão *et al.*, 2020; Ramos; Nuvoloni; Lopes *et al.*, 2021; Ribeiro *et al.*, 2009; Soares-Filho *et al.*, 2005, 2014). No decorrer dos anos, ações foram adotadas para a manutenção de biodiversidade, como a criação de Unidades de Conservação (UC) pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC (Brasil, 2000). Também, atualizações dos limites das Áreas de Preservação Permanentes (APP) e Reservas Legais (RL), ambas previstas no Código Florestal (Brasil, 2012). Contudo, mesmo com o aparato legal, ainda se percebe a expansão do desflorestamento, que se tornou um dos maiores responsáveis pelas perdas de ecossistemas e aumento de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) no país (Amaral *et al.*, 2019; Numata *et al.*, 2011; Rajão *et al.*, 2020). Este fenômeno, ao redor de UCs, nas zonas de amortecimento, contribui para a redução das conexões entre as espécies, transformando muitas UCs em “ilhas de biodiversidade” isoladas (Hausdorf, 2021). Além disso, a remoção florestal de áreas vulneráveis à erosão, proporcionam o aumento de sedimentos, que podem afetar nascentes e canais fluviais (Pinheiro, 2015), contribuindo ainda mais com distúrbios ecossistêmicos. Associado ao processo erosivo, ocorre ainda perdas de carbono armazenados no solo, sobretudo daqueles localizados nos primeiros horizontes (Silva, A. *et al.*, 2005). A matéria orgânica contida no solo, além do armazenamento do carbono, proporciona distintas propriedades, como umidade e porosidade, necessárias à vegetação bem como à dinâmica hídrica (Stefanoski *et al.*, 2013).

Neste contexto, as zonas de amortecimento, definidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) possuem a função de redução das interferências nas UCs, em um raio de contribuição (Rocha; Riondet; Silva, 2013). Nestas áreas, percebe-se que as ações de preservação, por uma certa parcela de produtores rurais, quando baseadas apenas nos aspectos ambientais são incipientes, sendo a manutenção de áreas naturais, muitas vezes, feita somente pela coerção legal. Diante dessa realidade, para que haja uma efetiva proteção, aspectos econômicos devem ser somados às formações naturais. Para que ocorra a ressignificação do ativo ambiental em propriedades rurais, faz-se necessário o envolvimento dos atores locais, pois estes são os promovedores das mudanças nos usos da terra (Fleischman *et al.*, 2022; Tedesco *et al.*, 2022). Muitas vezes os agricultores no entorno das UCs não estão cientes da forma como a vegetação nativa promove outros valores, como a melhoria no cultivo, redução de pragas, equilíbrio hídrico, dentre outros (Farrell *et al.*, 2021; Strand *et al.*, 2018), além da valoração e negociação do carbono na floresta em pé. Todos estes serviços ecossistêmicos são de grande

importância, mas de tímida aplicação nos processos decisórios de gestão da terra (Costanza *et al.*, 2014, 2017; Duarte, 2018).

As reservas naturais nas propriedades rurais não podem mais serem adjetivadas como passivos, em uma concepção de Comando e Controle (CC) direcionado à produção de alimentos sob uma perspectiva *top-down*. Formações naturais disponibilizam os serviços essenciais para a vida no planeta, e mesmo para a manutenção da agropecuária (Bergez *et al.*, 2022; Laurila-Pant *et al.*, 2015). O CC é um modelo centralizado de gestão, em que as decisões e ações são coordenadas por autoridades superiores, como governos e organizações hegemônicas em um dado mercado. *Top-down* refere-se a uma abordagem no CC, em que estratégias são impostas de cima para baixo pelas autoridades. Trata-se de um padrão típico em governos pragmáticos, ou naqueles em que de segmentos do mercado possuem grande influência nas decisões políticas do país. Em contraste ao *top-down*, a abordagem *bottom-up* valoriza a participação, as necessidades e as opiniões das comunidades locais e dos indivíduos diretamente afetados pelas políticas. Trata-se de uma nova perspectiva para a definição das estratégias de governança. Neste viés participativo, busca-se compreender as necessidades de comunidades locais e incluir essa demanda a outras escalas de governança, por exemplo regional ou federal, obtendo-se assim políticas mais inclusivas (Bachi *et al.*, 2023; Javaid *et al.*, 2022).

No Brasil, o CC é imperativo e composto por ações de *top-down*, em sua maioria, direcionado a atender em maior parte aos interesses do mercado. Deste modo, deve-se buscar esforços de distintos setores (público, privado e não-governamental) que impulsionem alternativas ao modelo *top-down*. Um exemplo desse modelo foi a implementação do Código Florestal de 2012, com reduções significativas das áreas de proteção ambiental em propriedades rurais (Rajão *et al.*, 2021), mesmo com a demonstração prejuízos ambientais, sociais e econômicos. Em mesmo argumento, visualiza-se o crescimento da agricultura de precisão (Agricultura 4.0) no mercado mundial, a partir do uso de tecnologias. A Agricultura 4.0, marcada pelo uso de tecnologias digitais, destaca a produção aliada a sustentabilidade (Javaid *et al.*, 2022). Todavia, em grande medida, ainda está majoritariamente direcionada aos resultados da produção, em nítida reprodução da Revolução Verde. Aumentar a produtividade por área já cultivada é uma importante contribuição contra o desflorestamento de novas áreas nativas. Contudo, deve atuar em equilíbrio com as áreas naturais, provedoras de serviços ecossistêmicos. Os exemplos que desenvolvem real sinergia entre cultivos e resiliência ambiental são escassos na literatura e ainda falta transcender o discurso de produção

sustentável. Fazem-se necessários, contudo, programas e projetos engajados, que possibilitem mudanças quanto aos usos da terra. Ações *bottom-up* com participação dos atores locais devem ser a base dos mecanismos de governança (Lambin *et al.*, 2014; Trancoso, 2021), sobretudo em países como o Brasil, composto por 5 milhões de pequenas propriedades rurais, que correspondem 77% das terras destinadas à produção agrícola (IBGE, 2022). Ações que valorizam os contextos locais trazem novas possibilidades à gestão das áreas rurais, mantendo-se a produção econômica, mas sem excluir os aspectos socioambientais. Cabe destacar a existência de algumas políticas mundiais que assimilaram prerrogativas *bottom-ups*. Um movimento mundial neste sentido, versa sobre o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) (Costanza *et al.*, 2014, 2017; Garrett *et al.*, 2022; Laurila-Pant *et al.*, 2015; Silva, H. *et al.*, 2015; Strand *et al.*, 2018), através do qual a manutenção das formações naturais pelos atores locais possui importância e gera renda para os proprietários rurais com a valoração do ativo ambiental.

Em âmbito nacional foi aprovada a Lei 14.119/21 que institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA), que em seu teor traz conceitos, objetivos e normas contratuais para a negociação de serviços ecossistêmicos (Brasil, 2021b). Em mesma medida, mas com direcionamento prático, foi sancionado, em 01 de outubro de 2021, o Decreto 10.828/21 que criou a Cédula de Produto Rural Verde (CPR-V) (Brasil, 2021a), um ativo ambiental a ser negociado no mercado nacional de carbono. No ano de 2022, publicou-se o Decreto 11.075, que “*estabelece os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa*” (Brasil, 2022). Também cabe destacar as cadeias produtivas florestais que englobam as etapas desde o manejo e extração de recursos naturais até a transformação, distribuição e comercialização de produtos florestais. Elas desempenham um papel importante na economia ao promover a conservação ambiental, gerar empregos e proporcionar matérias-primas essenciais para diversas indústrias. Tais instrumentos possibilitam e incentivam o produtor rural na manutenção de manchas de florestais e mesmo ações de restauração, uma vez que tais áreas passaram a ter também importância econômica, sobretudo no mercado de carbono.

Outra ação direcionada ao PSA foi o Programa Produtor de Água, criado pela Agência Nacional de Águas (ANA) em 2008. Este programa visa benefícios aos proprietários rurais, que promoverem práticas ativas para revitalização das bacias hidrográficas e redução da erosão do

solo (ANA, 2008). Ativos ambientais, mensuráveis podem ser negociados entre produtores rurais e empreendedores que desejam compensar suas emissões de GEE. Neste contexto, as UCs desempenham importante papel quanto a função de banco de sementes, manutenção da biodiversidade nativa e produção de água, que poderá induzir maior diversidade biológica e consequente valoração das manchas florestais em áreas em seu entorno (Myga-Pi; Sobala, 2022; Rocha; Riondet; Silva, 2013).

Em contrapartida, a gestão da terra, seguindo-se exclusivamente modelos *top-down*, poderão proporcionar um intenso efeito de borda em áreas protegidas. Por vez, torna-se necessário mudanças no paradigma produtivo rural, para o alcance de melhorias ambientais futuras. Mudanças estas com participação *bottom-up* aos processos decisórios de uso da terra, provenientes de maior engajamento local são promissoras (Lambin *et al.*, 2014; Tedesco *et al.*, 2022; Trancoso, 2021). Exemplo disso, destacam-se resultados da Agricultura de Baixo Carbono, Sistemas Agroflorestais e recuperação de nascentes, sobretudo em pequenas e médias propriedades, obtendo-se como resultado um uso da terra mais resiliente e sustentável (EMBRAPA, 2022). No entanto, ainda há uma barreira ideológica e a influência do *lobby* do agronegócio tradicional na aceitabilidade de técnicas alternativas para a produção rural. Entretanto, bons resultados econômicos e ambientais já podem ser percebidos em propriedades pioneiras, como a melhoria do plantio, redução de insumos agrícolas e perda de solo (EMBRAPA, 2022). Estas iniciativas locais também promoverão mudanças positivas ao contexto global, principalmente vinculado ao controle climático e aumento de biodiversidade (Mcelwee, 2021; PNUMA; FAO, 2020).

Pautado nas prerrogativas apresentadas, definiu-se como área estudo a ser investigada em detalhes, o Parque Estadual Serra do Brigadeiro (PESB) e sua zona de amortecimento (*buffer* de 10 quilômetros). A área de estudo está localizada na mesorregião da Zona da Mata mineira, envolvendo um total de 15 municípios da região, em predominância do bioma de Mata Atlântica. A área foi eleita, devido as características peculiares da paisagem, marcada pelo contraste presente no uso da terra. De um lado, o PESB apresenta boa conservação de formações naturais primárias e secundárias de Mata Atlântica. Por outro lado, a zona de amortecimento em seu entorno, exibe grande alteração assinalada pela presença de pastagens, ocasionadas majoritariamente por atividades agropecuárias.

Nesse cenário de mudanças, modelos espacialmente explícitos podem desempenhar papel relevante na compreensão da organização espacial e no fornecimento de *insights* para o futuro. No estudo, empregaram-se modelos determinísticos e probabilísticos, que, combinados, proporcionaram novas perspectivas de prognósticos da paisagem.

Os modelos determinísticos proporcionaram condicionantes fundamentais para a identificação de zonas prioritárias ao processo de restauração. Demonstram eficácia, uma vez que as áreas a serem restauradas estão intrinsecamente ligadas à sensibilidade ambiental e a variáveis biofísicas. Simultaneamente, os modelos probabilísticos incorporaram variáveis socioeconômicas, de significativa relevância na definição da gestão do território. Esses modelos viabilizaram a simulação dinâmica de cenários, ampliando as perspectivas da análise paisagística para além das abordagens convencionais.

Para a estruturação da pesquisa, foi fundamental estabelecer um conjunto de questões que forneceram a base conceitual para a condução do estudo. Criteriosamente selecionadas, orientaram a investigação e permitiram uma abordagem abrangente dos tópicos de interesse. Entre as questões norteadoras consideradas, destacam-se:

- i. Quais são as áreas estratégicas para a restauração ativa, no entorno do Parque Estadual Serra do Brigadeiro/MG, que podem ser incentivadas, por meio de Pagamentos por Serviços Ambientais?
- ii. Quais cenários futuros, considerando-se a adoção da restauração ativa das áreas estratégicas pelos proprietários rurais? Como esse processo de restauração pode influenciar a paisagem e o estoque de carbono na região?
- iii. Qual o custo de oportunidade para os produtores rurais, em um possível cenário de restauração?

De acordo com as normas do Código Florestal, a área de estudo possui um déficit de 2.273 hectares, desdobrando-se em 752 hectares destinados à reserva legal e 1.521 hectares a áreas de proteção permanente (CSR, 2023). Este déficit representa 1,6% das propriedades rurais circundante ao PESB. É crucial reconhecer que a contribuição das formações florestais vai além do simples atendimento às exigências da Lei, especialmente considerando que a Mata Atlântica desempenha um papel fundamental na oferta de serviços ecossistêmicos locais. Por outro lado, observa-se que uma significativa extensão de terras alocadas para pastagens subaproveitadas

com propósitos pecuários. Diante dessas observações preliminares, propuseram-se as seguintes **Hipóteses** de pesquisa:

i. Hipótese 1: as áreas indicadas à restauração ativa, proveniente da modelagem determinística, ultrapassarão o déficit ambiental da área de estudo de 2.273 hectares, declarados no Cadastro Ambiental Rural (CAR).

ii. Hipótese 2: a restauração florestal de áreas será mais atrativa, em termos de custo de oportunidade no mercado, quando comparada às áreas de pastagem, sem comprometer áreas produtivas, promovendo benefícios econômicos e ecológicos mais acentuados.

Se as hipóteses expostas forem confirmadas, poderão ser vislumbrados cenários estratégicos que poderão contribuir para políticas de ordenamento do território, direcionadas à recuperação ambiental e ao mesmo tempo com a produção econômica, minimizando-se conflitos com as atividades agropecuárias atuais.

Considerando as questões e hipóteses como base de reflexão, essa pesquisa de tese, por meio de métricas de paisagens e modelagens espaciais, tem como **Objetivo Principal** avaliar as mudanças na paisagem, identificar áreas estratégicas à restauração florestal, explorar cenários e medir o custo de oportunidade dessas áreas em relação a pastagem no entorno do Parque Estadual Serra do Brigadeiro (PESB). De modo específico, tem-se os seguintes **objetivos Intermediários**:

- i. Quantificar a estrutura e composição da paisagem e a mudança no padrão espacial ao longo de uma série temporal, utilizando métricas espaciais para os anos de 1985, 2005 e 2022.
- ii. Identificar as áreas estratégicas com maior aptidão para a restauração ativa, por meio da modelagem determinística.
- iii. Estimar mudanças no uso da terra, comprometido com a restauração florestal até o ano de 2050, por meio do modelo probabilístico tendencial/preditivo.
- iv. Estimar mudanças no uso da terra, comprometido com a restauração florestal até o ano de 2050, por meio do modelo probabilístico exploratório, considerando-se como *input* as áreas estratégicas à restauração ativa, obtidas na modelagem determinística.

v. Analisar o custo de oportunidade da restauração florestal em contraposição à manutenção de áreas de pastagem.

Esses objetivos são interligados e complementares, organizados em uma estrutura lógica e sequencial de modo a permitir uma análise sobre o processo de restauração florestal, seus impactos e potencialidades no contexto do PESB e das propriedades rurais circundantes. A identificação das áreas mais adequadas para a restauração e sua expansão nas propriedades rurais, sem o comprometimento das áreas produtivas, são etapas centrais deste estudo. Seu alcance poderá acarretar ganhos significativos tanto em termos ambientais quanto econômicos. Isso inclui a perspectiva de gerar créditos de carbono comercializáveis no mercado voluntário e de acessar subsídios de PSA para a produção de água. Além disso, esse processo também influenciará diretamente as atividades econômicas tradicionais nas áreas rurais, as quais dependem, em grande demanda, da prestação de serviços ecossistêmicos, como por exemplo nas cadeias produtivas florestais.

1.1. Justificativa:

Diversos ecossistemas estão próximos do ponto de inflexão (ponto crítico em que uma perturbação se torna irreversível no sistema ambiental). As perdas na Mata Atlântica foram crescentes, de forma que o bioma foi inserido na lista de formações naturais com maior risco de extinção do planeta (ALMEIDA, 2016).

Nos últimos anos, o Brasil se tornou protagonista internacional, como um país de grandes perdas ambientais, sobretudo para a agropecuária (Fearnside, 2020; Mammadova; Behagel; Masiero, 2020; Sauer, 2018). Neste cenário, faz-se necessário medidas que priorizem a manutenção dos remanescentes naturais e que impulsionem a restauração, como uma maneira para barrar o ponto de inflexão dos biomas.

As UCs são áreas importantes para a conservação, dispersão da biodiversidade e disponibilização de serviços ecossistêmicos. Contudo, a fragmentação e isolamento da vegetação nativa nas UCs e a grande antropização do mosaico da paisagem no seu entorno, reduzem sobremaneira seu potencial. Dessa maneira, UCs necessitam de conectividades com áreas para além de seus limites territoriais, ou seja, conexão com propriedades rurais em seu entorno. Existem vastas áreas em propriedades rurais que podem ser aproveitadas para a

recuperação da cobertura natural dos biomas Brasileiros. Por outro lado, torna-se notório que não há como realizar uma recuperação de todas as áreas, seja pelos usos dados à terra, mediante uma escala de produção, ou pelos encargos da restauração. Por vez, deve-se ter um esforço de identificar, por meio de estudos, áreas prioritárias e estratégicas para a restauração, que poderão durante os anos, produzir maior regeneração natural de novas áreas adjacentes. As políticas de PSA poderão se tornar bons *feedbacks* indutores à restauração, bem como instrumentos impulsionadores de ações *bottom-ups* para gestão do território, apesar de ainda possuírem pontuais aplicações no contexto de restauração florestal no Brasil.

Na área de estudo, apesar do destaque da pastagem, a pecuária é operada em escala local, o que se torna incoerente com o tamanho ocupado por esse uso da terra na paisagem. Diante desse caso e outros similares, faz-se necessário exames em profundidade, que busquem soluções ambientais, mas sem a perda da preocupação socioeconômica das comunidades locais.

Os benefícios ambientais estão atrelados à recomposição de parte do bioma, produção de água e a redução da erosão. O econômico é condicionado pela possibilidade de oferta das áreas florestais existentes e recuperadas ao crescente mercado voluntário de carbono, bem como acesso a subsídios e apoio técnico de programas ambientais. Também, a possibilidade de formação de cadeias produtivas do desenvolvimento de Produtos Florestais Não Madeireiros (PFNMs) e Sistemas Agroflorestais (SAFs) fortalecidos nas etapas da produção e comercialização, desde a preparação do solo até a entrega ao consumidor final. Os socioculturais são marcados pela maior participação dos atores locais, quanto aos processos decisórios da gestão territorial. A obtenção de benefícios induzirá maior grau de envolvimento, questionamento às decisões e mesmo novas proposições adequada à realidade local.

Os modelos espacialmente explícitos são possíveis ferramentas que podem auxiliar na compreensão da complexidade da paisagem da área de estudo. Eles permitem a quantificação e qualificação dos elementos espaciais e dos processos, tanto aqueles que estão em ocorrência quanto os que apresentam alta probabilidade de acontecer no futuro.

1.2. Resumo das etapas da pesquisa

A pesquisa foi realizada com o objetivo de desenvolver cenários de restauração florestal para a recuperação de uma parcela da Mata Atlântica. Para isso, o estudo analisou mudanças na

paisagem, identificou áreas prioritárias para a restauração florestal e avaliou o custo de oportunidade da implementação desses usos da terra em propriedades rurais ao redor do PESB. Partiu-se da premissa de que a implementação de áreas estratégicas com restauração ativa induz, no espaço e no tempo, o surgimento espontâneo (ativo) de novas áreas verdes devido ao Potencial de Regeneração Natural (PRN).

A restauração ativa de florestas envolve intervenções humanas diretas, como o plantio de mudas, a introdução de espécies nativas e a remoção de espécies invasoras, para acelerar a recuperação de ecossistemas degradados. Em contraste, a restauração passiva permite que a natureza se recupere por si só, interrompendo atividades degradantes, como pastoreio ou agricultura, e permitindo que os processos naturais de regeneração ocorram sem interferência humana significativa.

Além disso, iniciativas de Agricultura de Baixo Carbono (ABC) e Sistemas Agroflorestais (SAFs) são alternativas importantes para a restauração de áreas degradadas. Esses sistemas não só promovem a recuperação ecológica e a sustentabilidade ambiental, mas também proporcionam ganhos econômicos significativos para as comunidades envolvidas, ao combinar o cultivo de florestas com culturas agrícolas e criação de animais, permitindo a venda de produtos como frutas, madeira e outros itens agroflorestais.

A pesquisa também enfatizou a importância da participação comunitária e da educação ambiental, destacando que o envolvimento das comunidades locais é importante para o sucesso a longo prazo dos projetos de restauração. Através de workshops, treinamentos e programas de conscientização, as comunidades podem adquirir conhecimentos sobre práticas sustentáveis e compreender os benefícios ecológicos e econômicos da restauração florestal.

Por fim, o estudo sugere a implementação de políticas públicas que incentivem a restauração florestal, oferecendo subsídios e apoio técnico aos proprietários rurais. Políticas eficazes podem incluir a criação de mecanismos de PSA, que recompensem os proprietários pela manutenção de áreas restauradas e pela preservação dos ecossistemas, garantindo assim a sustentabilidade dos esforços de restauração a longo prazo.

A pesquisa foi conduzida com o objetivo de desenvolver cenários de restauração florestal para a recomposição de uma parcela da Mata Atlântica. O estudo avaliou mudanças na paisagem, identificou áreas prioritárias para restauração e mediu o custo de oportunidade de

O processo construtivo da investigação foi baseado em três etapas associadas e complementares, que produziram resultados contributivos aos objetivos nucleadores. Na primeira etapa (Diagnóstico da paisagem), avaliou-se a evolução das formações naturais na UC e entorno. Para cada ano eleito (1985, 2005 e 2022), foram utilizados *rasters* do uso e cobertura da terra disponibilizados pelo projeto Mapbiomas, coleção 8.0. O principal objetivo desta fase foi a descrição da alteração na paisagem, avaliado em uma série histórica. Buscou-se compreender os elementos espaciais, estruturas e processos atuantes durante os anos nomeados. Utilizaram-se métricas da paisagem específicas de área, forma, conexão e diversidade das manchas que subsidiaram a leitura dos arranjos espaciais no tempo. O software de domínio público utilizado para o processamento categórico das informações foi o Fragstats 4.2, desenvolvido na *University of Massachusetts, Amherst* (Mcgarigal, 2015).

A segunda etapa foi composta pela modelagem determinística por meio da Análise Hierárquica de Processos - Combinação Linear Ponderada (AHP-CLP). A AHP se baseia no ordenamento de variáveis, para o apoio à tomada de decisão, objetivada a modelar problemas complexos com a hierarquização de prioridades (Saaty, 1977, 1990) e vem sendo empregada inclusive, em pesquisas recentes, tais como em Khan et al. (2024), Risky et al. (2024) e Dağidir & Özkan (2024), por exemplo. A CLP é também um método aplicado em análises multivariáveis, em que cada elemento possui pesos respectivos a importância quanto ao fenômeno em estudo (Chandio et al., 2013; Valente; Petean; Vettorazzi, 2017), bem como mais recentes como em Costa, Ferko e Bittar (2024), Follmann & Foletto (2024) e Pereira et al. (2024). Foram utilizadas variáveis biofísicas para a identificação das áreas prioritárias a restauração i). Distância dos corpos hídricos, ii). Distância das manchas florestais, iii). Erosibilidade do solo, iv). Fator LS, e v). Taxa de carbono no solo). Também se definiu as classes restritas à restauração, sendo elas: i). Manchas urbanas; ii). Massas d'água, iii). Formações naturais e iv). Áreas agrícolas. Um direcionamento para a escolha das variáveis foi a possibilidade de participação ativa dos proprietários rurais, por meio de incentivos provenientes de PSA (*feedback*), com o crédito de carbono e produção de água (Programa Produtor de Água – ANA). Para se atender tais quesitos estabelecidos, as variáveis eleitas são relacionadas ao aumento da biomassa florestal (diretamente ligada ao estoque de carbono) e a redução à processos erosivos (necessários à produção de água). O produto obtido foi um modelo determinístico espacialmente explícito, com a identificação das áreas prioritárias à restauração

nas propriedades rurais na atualidade. O software utilizado nesta etapa foi o Qgis Desktop 3.30.2 que possui licença pública geral (QGIS, 2023).

A terceira etapa foi empenhada para a produção dos modelos dinâmicos probabilísticos e a simulação dos cenários. As variáveis de *inputs* para os modelos probabilísticos foram tanto biofísicas quanto socioeconômicas: i) Uso da terra, ii) Distância das estradas, iii) Distância de corpos hídricos, iv) Distância de manchas florestais, vi) Distância à unidade de conservação e v) Declividade. Produziram-se duas simulações projetadas para o ano de 2050: uma para um cenário predito e outro para um cenário exploratório. O modelo preditivo trouxe a tendência histórica do uso da terra, em um *status-quo*, sem interferências (*feedbacks*). Para o cenário exploratório foi acrescido como *input*, o resultado da segunda etapa (áreas prioritárias à restauração). A produção dos modelos probabilísticos dinâmicos foi elaborada com o uso software livre Dinâmica EGO 7.4.0, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR, 2023) no Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC/UFGM).

Após a concepção dos resultados dos modelos, fez-se a análise do custo de oportunidade da restauração florestal em comparação com a manutenção de áreas de pastagem. Considerou-se também as potencialidades do mercado de carbono e programas de PSA para incentivar a restauração florestal e a manutenção de áreas naturais.

2 – BASES TEÓRICAS E CONCEITUAIS

Neste capítulo são abordados, por meio de uma revisão da literatura acadêmica, os conceitos e definições que vão servir de base teórica, conforme os objetivos estabelecidos na pesquisa. Buscou-se, nas referências listadas, as bases sustentação para além da argumentação adotada, incluindo uma revisão sobre os aspectos socioambientais relacionados às mudanças climáticas, perdas da biodiversidade, serviços ecossistêmicos e pagamento por serviços ambientais. Também, abordaram-se alguns conceitos diretamente ligados aos processos metodológicos, tais como métricas da paisagem, modelos determinísticos e modelos dinâmicos probabilísticos. Em um primeiro momento, buscou-se trazer questões ambientais mais gerais, cujas consequências envolvem as alterações climáticas e suas consequências às perdas ambientais.

2.1. As mudanças climáticas e as consequências ambientais

O debate sobre o processo de aquecimento global ganhou notoriedade social, acadêmica e política nas últimas décadas, devido às mudanças rápidas percebidas no planeta. Estudos paleoclimáticos demonstram que o processo de aquecimento e resfriamento planetário são naturais, em uma escala profunda (geológica) em que fatores internos e externos promovem variações térmicas que demarcam ciclos glaciais e interglaciais (Hawken, 2017; Nobre; Reid; Veiga, 2012). Como fatores internos, pode-se citar movimentos tectônicos, mudanças de correntes marítimas e vulcanismo, sendo este último fenômeno um importante *feedback* responsável por mudanças de curta duração, sobretudo atreladas ao resfriamento (Hawken, 2017; Wanner; Pfister; Neukom, 2022). No tocante aos fatores externos, destaca-se a variação da inclinação do planeta, que ocasionaram mudanças nas taxas de radiação solar (Hawken, 2017).

Apesar da ciclicidade climática natural, parece evidente a influência humana para modificações aceleradas. Nos últimos 400 mil anos, registaram-se quatro ciclos climáticos. Atualmente nos encontramos no ciclo interglacial, no qual para se atingir a elevação da temperatura em 6°C foram necessários 10 mil anos (Nobre; Reid; Veiga, 2012). Com o advento das civilizações, ocorreu o recrudescimento do uso de fontes energéticas que são reservas de

carbono, como madeira e combustíveis fósseis. Contudo, especialmente a partir da Revolução Industrial, registrou-se ampla conversão de matéria bruta (carvão e petróleo) em energia e o volume de GEE aumentou exponencialmente (Mcelwee, 2021; Nobre; Reid; Veiga, 2012), cujos impactos assumiram volumes sem precedentes. O gás carbônico representa a maior parcela dos GEE presentes na atmosfera. Por vez, é utilizado como *proxy* para medir os efeitos do aquecimento. Assim, os demais GEE possuem seu efeito convertido para a de carbono equivalente (CO₂e) tratado na literatura, relatórios e acordos. O carbono equivalente é o resultado da quantidade do gás multiplicado por seu potencial de aquecimento global (GWP).

O aquecimento global proveniente da elevação dos níveis do dióxido de carbono (CO₂) em forma reativa (gás) influencia sobremaneira com o aquecimento global e seus desdobramentos, como seca prolongadas, tempestades severas, invernos rigorosos e empobrecimento do solo (Mcelwee, 2021). Constitui 55% das emissões e possui reatividade na atmosfera acima 100 anos (Hawken, 2017). O gás metano (CH₄) é principalmente gerado pela decomposição de matéria orgânica. Apesar de menor expressividade (22%) em relação ao carbono, possui efeito de aquecimento 25 vezes maior, em mesma concentração (Hawken, 2017). O óxido nitroso (N₂O) é proveniente da fabricação de fertilizantes e a desnitrificação do solo em processos agrícolas. Ainda que possua baixa concentração (6%) entre os GEE, tem o efeito 298 vezes maior do que o gás carbônico (IPCC, 2021).

A concentração desses gases na atmosfera se tornou nociva ao equilíbrio sistêmico (Osman *et al.*, 2021). Consequência disso, registrou-se na atualidade o aumento em 1,1°C na temperatura média global em relação ao período pré-industrial. De acordo com o IPCC (2021), a contenção da oscilação térmica abaixo de 1,5°C não será alcançada. Para o êxito esperado, seriam necessárias mudanças expressivas em aspectos socioeconômicos. A partir do ano de 2050, caso não haja uma considerável mudança quanto às emissões, o incremento térmico será acima de 2°C, e no final do século atingirá 4,5°C, fato este que potencializará os fenômenos climáticos extremos, sendo as consequências trazidas por muitos deles irreversíveis (IPCC, 2021; Osman *et al.*, 2021).

Diante do cenário de crise ambiental, dadas as ameaças trazidas das mudanças climáticas, várias foram as reações, tanto políticas, quanto eminentemente acadêmicas. No cenário político, diversos foram os tratados estabelecidos com o intuito do controle climático. Vale destacar que, ao se abordar relações climáticas, indissociavelmente são arguidas as

condições da biodiversidade, pois ambas possuem relações interdependentes (Farooqi *et al.*, 2022).

Dentre os tratados para este fim, destacam-se: Protocolo de Montreal (1989); Eco-92 (1992); Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (1992); Protocolo de Kyoto (1997), REDD+ (2013), Acordo de Paris (2015) e o Mercado Global de Carbono. Cabe ainda citar que, apesar de serem celebrados entre nações, diversos atores como organizações não governamentais (ONGs), comunidade científica, empresas e sociedade civil foram importantes para o avanço dos acordos. O rol de tratados é extenso, mas aqui são expostos aqueles entendidos com maior expressividade, por condicionarem efeitos mensuráveis no tocante às mudanças climáticas e, consequentemente na biodiversidade.

O Protocolo de Montreal foi assinado em 1989 e previa a redução de produtos destrutivos da camada de ozônio, sobretudo os chamados CFCs utilizados na fabricação de aerossóis e aparelhos de refrigeração (UN, 2020). Este protocolo foi o que obteve maior eficiência ao combate climático (98%), já que os CFCs também promovem o aquecimento. O sucesso do protocolo está associado a adesão universal dos países e as mudanças adotadas pelos setores produtivos (Gonzalez; Taddonio; Sherman, 2015).

A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como ECO-92, realizada no Rio de Janeiro em 1992, foi um evento que colocou a sustentabilidade no centro das discussões globais. As principais discussões incluíram a integração de políticas econômicas e ambientais, resultando na Agenda 21, um plano de ação abrangente para promover o desenvolvimento sustentável globalmente. Também foram estabelecidas a Convenção sobre Mudança do Clima e a Convenção sobre Diversidade Biológica, que fornecem marcos para a cooperação internacional na mitigação das mudanças climáticas e na preservação da biodiversidade (Júnior & Quintella, 2008).

Na Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) – assinada por 175 países em Nova York, em 1992, teve como objetivo o controle de emissão de GEE, de maneira que não atingisse uma concentração maléfica aos seres humanos (UN, 1992). Na UNFCCC, destacou-se a responsabilidade comum, porém diferenciada sobre as emissões. Historicamente os países desenvolvidos foram os maiores emissores dos GEE, logo deveriam possuir maior participação ativa quanto a estabilização climática. Neste tratado não se estabeleceu os níveis de emissões precisas que proporcionariam uma segurança futura. Mas os países desenvolvidos se comprometeram a reduzir as emissões gradativamente. Também não se definiu medidas coercitivas para aquelas nações que não cumprissem o tratado. Apesar das

lacunas, foi importante para esclarecer publicamente os impactos dos desastres climáticos e deliberar protocolos a serem seguidos em outras ações futuras (Lyon, 2018).

A partir da UNFCCC ocorreram periodicamente as Conferências das Partes (COP), compostas pelos países membros para debates e ajustes sobre a política climática. O segundo acordo sobre mudanças climáticas foi o Protocolo de Kyoto de 1997, que institucionalizou diretrizes da COP-1 ocorrida em Berlin em 1995. No Protocolo de Kyoto se definiu as metas a serem alcançadas. Os países comprometeram em reduzir entre 2008 e 2012 a taxa de 5,2% dos GEE emitidos no ano de 1990 (UN, 1998). Criou-se os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) que possibilitava flexibilizações para se atingirem as metas de emissão, sendo eles: i) mercado de carbono – países que não atingissem a meta de redução, poderiam adquirir cotas de carbono de outras nações. Neste mecanismo o Brasil se tornou atuante, por meio de negociações com outras nações, com vendas diretas das cotas de carbono (Godoy; Pamplona, 2007); ii) Investimentos de países desenvolvidos em projetos de redução de GEE em países em desenvolvimento e iii) Implementação conjunta – países desenvolvidos poderiam se aliar em projetos que visem a conter o avanço de emissões (UN, 1998).

No Protocolo de Kyoto os países em desenvolvimento não possuíam metas a serem alcançadas, que foi um dos problemas em sua consolidação. Outro entrave foi a não aderência de importantes países em termo de emissões de GEE, tais como os Estados Unidos. Após o Protocolo de Kyoto, outras COP's ocorreram objetivadas a novas adequações.

O REDD+ foi estabelecido na COP-19, no ano de 2013 em Varsóvia. Trata-se de uma política de compensação financeira à países em desenvolvimento que alcancem resultados de redução de emissões de GEE ocasionados pelo desmatamento e degradação florestal (MMA, 2016). Leva-se em consideração também o estoque de carbono florestal e seu aumento, bem como o manejo sustentável da floresta (MMA, 2016).

Na COP-21, ocorrida na França em 2015, aprovou-se o Acordo de Paris, um dos mais importantes acordos climáticos. Neste acordo, estabeleceu-se a contenção do aquecimento global em 2°C, mas preferencialmente, mantê-lo em 1,5°C (UN, 2015). Uma debilidade do Acordo de Paris foi a baixa ambição, já que cada nação poderia definir sua própria meta, apesar de haver um comitê regulador que avaliaria as proposições (Rose *et al.*, 2017). Também recebeu críticas quanto a não definição clara dos meios de financiamento para programas, penalidades aos descumpridores e a manutenção de propostas que demonstraram baixa eficiência no passado. Diante disso, pouco provável que as metas sejam atingidas. A saída dos Estados Unidos em 2017 também foi uma perda para se atingir as metas.

O Mercado Global de Carbono foi consolidado na COP-26, em 2021, em Glasgow/Escócia. A negociação dos estoques do carbono já ocorria anteriormente, mas com o Mercado Global de Carbono, consolidaram-se novas regras impulsionadoras para a geração de renda e redução de GEE (Russel; Crawley, 2021). Por exemplo, com as novas regras, parte das metas nacionais Brasileiras de redução das emissões poderão ser repassadas ao setor privado, anteriormente não incluso, com exceção ao setor de combustíveis. Nesta nova configuração, pode-se haver uma ascensão das negociações de descarbonização por meio da captura na biomassa.

A COP-27 e a COP-28 foram eventos-chave no diálogo global sobre o clima, envolvendo nações de todo o mundo para discutir e formular políticas para combater as mudanças climáticas. A COP-27, realizada em Sharm El Sheikh, Egito, teve foco na mobilização de financiamento para nações em desenvolvimento, visando mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Discutiu-se sobre o estabelecimento de um fundo para compensar países vulneráveis pelos danos já causados pelas mudanças climáticas. Houve um impulso significativo para o reconhecimento formal dos danos causados pelas mudanças climáticas e a necessidade de compensação. Já a COP-28, ocorrida em Dubai em 2023, ganhou notoriedade pelo acordo entre as partes para o início da transição dos combustíveis fósseis para fontes alternativas e renováveis de energia. Avanços de temas de COP's passadas também foram discutidos entre os participantes como agricultura, neutralidade de carbono, mitigação ao aquecimento global por meio da biodiversidade dentre outros assuntos.

O contexto político e estratégico apresentado, forneceu subsídios para formulação de acordos e tratador que visem a manutenção e restauração ambiental. Dentre esses tratados, cabe destacar a Década da Restauração de Ecossistemas (2021-2030), uma iniciativa global proclamada pela Assembleia Geral das Nações Unidas. A Década da Restauração visa promover colaboração entre governos, organizações não governamentais, comunidades locais e o setor privado para restaurar ecossistemas críticos, e, com isso, contribuir com a biodiversidade e a resiliência às mudanças climáticas.

2.2. A Década da Restauração de Ecossistemas

Muitos ecossistemas mundiais se encontram em um limiar de degradação crítica. Extinção de espécies, aumento de catástrofes naturais e doenças são consequências diretas do

descompasso planetário. No contexto de convenções para mitigações, a ONU, por meio do PNUMA, em parceria com a FAO e outros colaboradores, estabeleceu a Década de Restauração de Ecossistemas (2021-2030), no intuito de se obter ações concisas para a redução de mudanças depreciativas (UN, 2019).

A chamada Década de Restauração tem como objetivo prevenir, deter e reverter degradações ecossistêmicas continentais e oceânicas. Essas ações permeiam com os interesses da Agenda 2030 e são contributivas ao combate à crise climática e a perda de biodiversidade. Além disso atendem interesses de tratados internacionais como: Acordo de Paris e REDD+ (PNUMA; FAO, 2020; Tedesco *et al.*, 2022).

De acordo com a ONU (2021) a degradação de ecossistemas atinge 3,2 bilhões de pessoas no mundo. Dentre as perdas, destaca-se a queda de 20% da produtividade por declínio de fertilidade do solo ocasionadas por esgotamento, erosão e poluição. Em um cenário para 2050, em mesmas condições atuais, os plantios poderão reduzir 10% de sua produtividade, devido mudanças climáticas. Por consequência, a fome poderá estar presente, com maior intensidade entre diversas populações, sobretudo as mais frágeis. Isso significa uma diminuição na disponibilidade de alimentos essenciais, especialmente em países em desenvolvimento (Richards; Gauch; Allwood, 2023; Zhang *et al.*, 2022). Por exemplo, a queda na produção do trigo afetaria diretamente mais de 3,5 milhões de pessoas em 95 países (Zhang *et al.*, 2022). Também cabe destacar que a baixa na produção, ocasionaria a elevação do preço, que impactaria de forma contundente as populações mais pobres (Zhang *et al.*, 2022).

Em oposição, caso haja restauração de 350 milhões de hectares no planeta até 2050, estima-se um retorno de 9 trilhões de dólares em serviços ecossistêmicos, com a remoção média de 20 Gt de GEE (ONU, 2021). No tocante à segurança alimentar, a restauração florestal comprova positivos indícios à produção de alimentos. Em localidades agrícolas no sul da Etiópia, demonstraram aumento da produtividade do trigo em campos próximos a áreas florestais (Yang; Gergel; Baudron, 2020). No Brasil, a floresta demonstrou efeitos positivos na produção de cana-de-açúcar, utilizada como alimento e também como fonte alternativa aos combustíveis fósseis (Bieluczyk *et al.*, 2023). Neste sentido, verifica-se que o alcance dos objetivos da Década da Restauração perpassa os benefícios ambientais. As propositivas de restauração possibilitam o engajamento de populações locais, geração de postos de trabalhos, segurança alimentar e ganhos econômicos.

Em relação à economia, registrou-se no início de 2020 no Brasil, 4.713 postos de trabalho temporários e 3.510 permanentes, sendo 60% deles em projetos de restauração (Brancalion *et al.*, 2022). A restauração poderá gerar 0,42 empregos por hectare, com a potencialidade de 1,0 a 2,5 milhões de empregos diretos, caso haja a implementação da meta de 12 milhões de hectares até o ano de 2030, previstos na Planaveg (Brancalion *et al.*, 2022; Brasil, 2017). Também vale destacar a contribuição econômica das cadeias produtivas da restauração, que envolvem uma série de atividades coordenadas para restaurar ecossistemas degradados, como: coleta de sementes, reprodução em viveiros, reintrodução de espécies no ambiente, bem como associação com SAFs que proporcionam retorno financeiro em curto a médio prazo aos produtores rurais (Benini, *et al.*, 2016).

A restauração demonstra ser uma importante estratégia para mitigações climáticas, aumento de biodiversidade e incentivo à participação de atores locais (Fleischman *et al.*, 2022). Tornou-se evidente que para o avanço de acordos climáticos e de recuperação da biodiversidade, faz-se necessário o envolvimento das populações locais (PNUMA; FAO, 2020). Posicionamentos CC com abordagem unicamente *top-down*, sem a consideração dos condicionantes socioculturais e segurança alimentar das localidades comprometem o sucesso da restauração em projetos de longo prazo (Fleischman *et al.*, 2022; Tedesco *et al.*, 2022).

Em comunidade rurais, florestas naturais são economicamente menos valiosas que os outros usos da terra (Brancalion *et al.*, 2012). Para o alcance das mudanças necessárias, as formações florestais devem ser valoradas, pela disponibilidade de seus serviços ecossistêmicos e, também gerar ganhos financeiros aos promovedores deste patrimônio (Costanza *et al.*, 2014). Há, contudo, questões específicas sobre a problemática ambiental associada à produção agropecuária no país.

2.3. A produção agropecuária Brasileira e a questão ambiental

A forma de produção de alimentos, sobretudo nas últimas décadas, foi transformada pela introdução de maquinários, insumos e melhoria genética de espécies como a soja, milho e o gado (Cunha *et al.*, 2008; Wolff *et al.*, 2022), dado elevado impulso ao agronegócio no país. Estas *commodities* alimentícias respondem por grande parte do Produto Interno Brasileiro (PIB)

Brasileiro (Brugnaro; Bacha, 2009), apesar da considerável parcela da produção ser destinada ao mercado externo (Araujo *et al.*, 2007; Bredow; Lélis; Cunha, 2016; Brugnaro; Bacha, 2009).

Ainda que se tenha ocorrido o aprimoramento do aparato tecnológico disponível, muito do incremento produtivo, para fins agropecuários, fez-se por meio da expansão territorial, especialmente em países tropicais, com larga extensão territorial, como o Brasil (Carvalho-Ribeiro *et al.*, 2020; Soares-Filho *et al.*, 2014). Trata-se de prática que proporciona efeitos mais acelerados e menos custosos, sob uma ótica imediatista (Fearnside, 2020).

Os espaços agropecuários estão presentes nos distintos contextos históricos de formação do território Brasileiro. O “Lobby Alimentar” se tornou um importante instrumento para a consolidação de novas fronteiras agropecuárias (Azevedo, 2019). O discurso da produção da alimentos conduziu à validação e à aceitabilidade do avanço do desflorestamento sobre áreas frágeis necessárias ao equilíbrio de ambiental, durante décadas (Mammadova; Behagel; Masiero, 2020). Também proporcionou apropriações escusas de terras (grilagem), que geram conflitos com povos tradicionais como indígenas, quilombolas e comunidades rurais (Dell’Angelo *et al.*, 2021; Sauer, 2018).

Após a Independência, o Brasil concentrou a maior parte de sua economia no setor agrícola, sobretudo com a produção de café e gado na Região Sudeste e cana-de-açúcar na Região Nordeste (Abreu; LAGO, 2010). Nessas regiões se concentram também o maior número de pessoas, devido ao processo histórico de formação. Consequência disso, a Mata Atlântica foi o bioma Brasileiro mais devastado, apresentando atualmente vultosa fragmentação (Ribeiro *et al.*, 2009).

Posterior ao período de ocupação do Sudeste e Litoral Nordestino, a próxima fronteira de expansão foi para a Região Centro-Oeste, com o cultivo da soja e criação de gado. Em sequência, a fronteira migrou para Noroeste, mais especificamente para o Estado de Mato Grosso, onde se iniciou um intenso processo de desflorestamento da Floresta Amazônica (Ioris, 2016) e para o Cerrado, com o impulsionamento da produção de grãos, sobretudo a soja (Lopes, *et al.*, 2020). Em mesma medida, destaca-se a Região do Matopiba, o novo polo agropecuário entre as Regiões Nordeste e Norte, que atualmente responde por grande parte da produção de carne bovina e soja. Em 2018, a região atingiu o quantitativo de 14 milhões de toneladas de soja (Bolfe *et al.*, 2016) com perspectiva de uma produção de 33 milhões de toneladas para 2030 (MAPA, 2016). Em meio à expansão da agroindústria na Região do Matopiba, destacam-

se ações *bottom-ups* que demonstram que é possível associar produção e valorização socioambiental. Essas iniciativas fomentam o desenvolvimento econômico regional, alinhando-se à preservação das formações do Cerrado e da Floresta Amazônica. Promovidas por uma rede de atores, tais ações são denominadas "sementes do Matopiba", são essenciais na construção de novos cenários de usos da terra (Bachi *et al.*, 2023).

No contexto Brasileiro, ao se tratar do aumento da produção da agroindústria às custas de expansão de áreas agricultáveis sobre as formações naturais, observa-se que tais ações também são praticadas por pequenas e médias propriedades rurais. Um exemplo prático, em que produtores locais acompanham a lógica do mercado é registrada pelo largo uso de agrotóxicos em cultivos, sendo muitos destes produtos proibidos em muitos países, devido aos efeitos nocivos ao meio ambiente e a saúde humana (Barraza *et al.*, 2011; Paumgarten, 2020). Esta decisão de *top-down* fez do Brasil ocupante de uma posição entre os quatro maiores consumidores *per capita* de agrotóxico do mundo (Paumgarten, 2020). Além disso, o desflorestamento para fins agropecuários ainda responde por grande demanda de emissões de GEE do país (Assunção; Gandour; Rocha, 2015; Carvalho-Ribeiro *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2013; Soares-Filho *et al.*, 2014).

Neste contexto paradoxal, marcado pela união de tecnologias e gestão pragmática do uso da terra, tem-se chamado bastante atenção as perdas ambientais, o que requer contínuo monitoramento. Em 2005, o relatório do *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA) já havia confirmado que o aumento mundial da produção de alimentos, em grande medida foi via desflorestamento (MEA, 2005) e tal afirmativa se perdura até os dias atuais.

Em contrapartida, o aumento na produção agropecuária não produziu respostas positivas para a redução da pobreza e fome mundial (FAO, 2013; MEA, 2005). Ao contrário, em 2020 principalmente pelo efeito da COVID-19, registrou-se o maior número de pessoas em estado de insegurança alimentar e desnutrição, 9,9% da população, próximo de 811 milhões de pessoas (FAO, 2021). Anterior à pandemia os números da fome já eram significativos, exemplo disso em 2019, 8,4% (688 milhões de pessoas) se enquadravam na estatística (FAO, 2021). Estes dados evidenciam uma desconexão entre a narrativa de que é preciso expandir as áreas de produção agrícola para o combate à fome. Na verdade, os registros indicam um crescimento no número de pessoas enfrentando subnutrição mesmo diante da abertura de novas áreas cultiváveis e do estabelecimento de recordes na produção agrícola.

Há neste sentido, a necessidade de estabelecer coerência em tratativas que envolvam a produção, qualidade ambiental e segurança alimentar, o que requer estratégias de ação que incluem a valoração de serviços ecossistêmicos disponíveis ao homem. Os serviços ecossistêmicos assumem, portanto, essências à manutenção dos processos biofísicos do planeta, embora raramente faça parte de pautas sobre o planejamento territorial.

2.4. Serviços ecossistêmicos

A interação entre os ecossistemas cria as condições de sobrevivência para distintas espécies no planeta, incluindo o próprio homem. Esta relação possibilita importantes processos biofísicos, como a fixação de nutrientes no solo, controle climático, ciclagem da água, dentre outros que são funções ecossistêmicas (Degroot, 2006; MEA, 2005). Estas funções, quando disponibilizadas diretamente ao interesse humano são reconhecidas como serviços ecossistêmicos (Costanza, 2000; Costanza *et al.*, 1997; Degroot, 2006). Contudo, a relação entre função e serviços não é simples. Uma função ecossistêmica pode promover distintos serviços ecossistêmicos, assim como um serviço ecossistêmico pode ser gerado de mais de uma função (Costanza *et al.*, 1997). Os benefícios provenientes dos serviços ecossistêmicos fazem parte do capital natural.

Os serviços ecossistêmicos possuem destaque em debates sobre o ordenamento territorial, sobretudo na Ecologia da Paisagem. Possui um cunho eminentemente transdisciplinar, ao avaliar os componentes físicos e fluxos de energia, com um olhar para as mudanças espaciais (Metzger, 2001). Além dos processos que envolvem os elementos naturais, a Ecologia da Paisagem também aborda contextos socioculturais que fazem parte das paisagens (Carvalho-Ribeiro *et al.*, 2018; Hinata; Basso; Santos, 2021). Os serviços ecossistêmicos são resultantes de arranjos complexos, disponibilizados pelos ecossistemas para o bem-estar do homem e para a manutenção de outras espécies (Burkhard *et al.*, 2009; Costanza *et al.*, 1997; Duarte, 2018; Reid, 2005; Uuemaa; Mander; Marja, 2013). Para além disso, Costanza (2000) expõe que os serviços ecossistêmicos devem estar no cerne dos planejamentos produtivos. Anteriormente, a evolução econômica era limitada no capital econômico e intelectual das nações e empresas. Todavia, na atualidade o capital natural, com as disponibilidades dos recursos, que influenciam nas criações de produtos e na vida humana, tornaram-se elementos essenciais que, inclusive devem ser aumentados (Costanza, 2000).

Os serviços ecossistêmicos também possuem ampla diversidade devido a variabilidade de insumos disponibilizados, podendo ser categorizados. O quantitativo de categorias varia na literatura, mas em certa medida, aquelas de maior consenso são: regulação, provisão, cultural e suporte (COSTANZA *et al.*, 2017; MEA, 2005). Os serviços de regulação são vinculados às funções de ajustagem ecossistêmica como a qualidade da água e do ar; controle climático; resistência do solo; controle de doenças, entre outros. A provisão é estabelecida pelos abastecimentos naturais como infiltração e percolação da água ou, ainda, seminaturais como a agricultura. Os serviços de provisão vão além dos itens alimentícios; neles estão incluídos também as fontes de recursos energéticos como minerais, carvão, lenha e o acesso à água. Os serviços culturais destacam os valores abstratos atribuídos à contemplação e aprendizado da paisagem, bem como valores espirituais e estéticos. Sua interpretação é inerente ao grupo que faz o uso de determinada paisagem, por vez possui maior complexidade quanto à análise e requer aprofundamento no entendimento das relações por parte do pesquisador, não sendo possível apenas mensurações quantitativas (CARVALHO-RIBEIRO *et al.*, 2018). Os serviços de suportes são os elos entre as categorias anteriores. Possuem influência indireta, em longo prazo, sobre o homem. As alterações das demais categorias refletem no estado final deste serviço, como a ciclagem de nutrientes, processos de purificação da água, formação de solos, dentre outros (DUARTE, 2018; MEA, 2005).

A valorização dos serviços ecossistêmicos é fundamental para o bem-estar humano e a sustentabilidade ambiental. Reconhecendo a importância desses benefícios naturais, o conceito de PSA surge como uma estratégia eficaz para incentivar práticas de conservação e restauração ambiental. Por meio de incentivos financeiros e econômicos, o PSA busca recompensar os proprietários de terras e comunidades que preservam e recuperam áreas naturais, promovendo assim a manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais para a sociedade.

2.5. Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)

Algumas fontes científicas adotam a descrição de serviços ecossistêmicos e serviços ambientais como sinônimos. Outras, os diferenciam quanto ao fim. Nestas, serviços ambientais se distinguem dos serviços ecossistêmicos por serem provenientes das atividades humanas para manutenção e/ou recuperação de ambientes terrestres ou marinhos, com o fim de ampliar os serviços ecossistêmicos (MMA, 2023). Como por exemplo, a promoção de restauração de áreas

com vegetação nativa, recuperação ou aumento de espécies em extinção, manutenção do fluxo d'água (MMA, 2023). A pesquisa aqui trazida, baseia-se nesta segunda definição.

Os serviços ecossistêmicos apesar de essenciais ao bem-estar humano e à manutenção do planeta, continuamente são reduzidos em pautas políticas e econômicas. A subvalorização, de certa maneira está atrelada na dificuldade de expressar numericamente a importância das funções ambientais, no contexto convencional de mercado (Degroot, 2006).

Frequentemente, tais serviços são percebidos como bens intangíveis, sem uma unidade que expresse o grau de sua importância. Um argumento contrário à valoração, pauta-se na afirmativa que ecossistemas devem ser protegidos por razões morais ou estéticas, e assim não necessitaria de avaliações monetárias (Costanza, 2000). Andrade & Romero (2009) destacam que, o fato de a maioria dos serviços ecossistêmicos serem bens públicos, cria o agravo quanto ao seu reconhecimento. Com isso, estabelece-se um reducionismo de provisões disponibilizadas pelo capital natural, trazendo-se ao contexto econômico, apenas serviços que estão diretamente relacionados com a produção de bens reconhecidos no mercado tradicional, como a provisão de fontes fósseis energéticas (Andrade & Romeiro, 2009).

A subestimação dos serviços provenientes do capital natural é prejudicial tanto para o meio ambiente quanto para a economia. Em relação ao meio ambiente, os usos tradicionais dados à terra possuem maior valor, mesmo que o resultado final seja a produção de áreas degradadas. No tocante à economia, a falta de valoração do capital natural, bloqueia novas formas de negócios e o desmontamento de produtos sustentáveis, que já demonstraram boa aceitabilidade comercial. Tem-se como exemplo os Produtos Florestais Não-Madeireiros (PFNMs) mantidos por comunidades tradicionais (Bondé *et al.*, 2020). Muitos povos tradicionais, além da extração consciente e transformação da matéria-prima em artigos comerciais, promovem a recuperação de áreas. Assim, contribuem com a ampliação de serviços ecossistêmicos que atenderão outras pessoas, logo se faz justo a recompensa financeira ou econômica.

Costanza *et al* (1997) em revisões sobre os valores do capital natural, estimaram no ano de 1997, tinha-se disponibilizado pela natureza, uma média anual de 33 trilhões de dólares em serviços ecossistêmicos. Em mesma metodologia, para o ano de 2011, mas com valores atualizados, obtiveram o quantitativo de benefícios ambientais em 125 trilhões de dólares (Costanza *et al.*, 2014).

Apesar de se discutir há décadas sobre o PSA, as ações direcionadas para este sentido foram tênues, quando comparado às potencialidades existentes. No Brasil, algumas ações de PSA foram institucionalizadas com mobilizações ativas de comunidades acadêmicas e ONGs. O PSA é um benefício transferido a atores que cumpram exigências quanto a manutenção e melhoria de serviços ecossistêmicos (ANA, 2008). O benefício pode ser percebido por compensação financeira ou econômica, por exemplo, prestação de consultorias técnicas aos produtores rurais.

De acordo com os objetivos da pesquisa, cabe uma breve descrição de dois tipos de PSA em vigência no Brasil, que são atrelados ao contexto de restauração florestal, sendo eles: Programa Produtor de Água e Crédito de Carbono.

2.5.1. Programa Produtor de Água

O Programa Produtor de Água foi criado pela Agência Nacional de Águas (ANA) no ano de 2008. O intuito do programa é a compensação financeira e econômica, ao produtor rural que promover a melhoria das águas, que compõem a bacia que se encontra inserido. Dentre as medidas para se atingir o objetivo principal do programa, destacam-se a contenção da perda de solo e processos erosivos, por meio da recomposição florestal de áreas dentro da propriedade rural (ANA, 2008). Tal ação, impacta para além da produção de água, obtendo-se bons êxitos quanto ao aprisionamento de carbono, melhoria da qualidade do ar e aumento da biodiversidade local (Sarira *et al.*, 2022).

No Brasil, levantamentos sobre PSA identificaram mais de 2000 iniciativas de incentivo econômico para serviços ambientais, mas apenas 37 programas de PSA são comprovadamente ativos (Mota *et al.*, 2023). Dentre os programas de PSA efetivos, a maioria (69,44%) estão relacionados à água (Mota *et al.*, 2023), devido a importância do recurso para as espécies. Apesar da água ser capital natural abundante no país, encontra-se em declínio, tanto em quantidade quanto em qualidade. Somente a perda de água tratada para o consumo humano, registram-se 7,3 bilhões de m³ por dia no país, enquanto 33 milhões de Brasileiros são desprovidos de acesso ao recurso (Tratabrasil, 2023).

No tocante a territórios rurais, solos expostos ou em processo de erosão geram elevados prejuízos para às reservas hídricas e para a agricultura, sobretudo ocasionado pelo escoamento

superficial (Choudhury; Nengzouzam; Islam, 2022). A erosão do solo (laminar e concentrada) acarreta uma perda de 75 bilhões de toneladas de solo por ano em todo o mundo (Eswaran *et al.*, 2001). No Brasil, a perda e degradação dos solos em propriedades rurais geram prejuízos de 3 bilhões de dólares ao ano. Todavia, ao se considerar os impactos externos às propriedades rurais, como assoreamentos e tratamentos da água para consumo, somam-se mais 1,3 bilhões de dólares de perdas anuais (ANA, 2008).

A eficiência do produtor rural no combate aos processos erosivos é percebida na retenção de sedimentos, que chegariam aos corpos hídricos e no processo de infiltração. Estes índices são medidos na turbidez e volume de água nos canais fluviais e comparados com valores aferidos em períodos anteriores (ANA, 2008). A certificação e o recurso provenientes do Programa Produtor de Água são repassados aos proprietários, após a constatação de melhores índices. Por vez, o programa é um importante instrumento ao fomento de serviços ecossistêmicos, sobretudo em propriedades rurais próximas a nascentes, como aquelas no entorno do PESB.

Cabe destacar a aplicação de sucesso no município de Extrema/MG a partir de 2005, estabelecida pelo programa intitulado Conservador das Águas, que utilizou da metodologia que auxiliou a configuração do Programa Produtor de Água. Extrema foi o primeiro município no Brasil na aplicação de PSA para produtores rurais que aderiram às práticas de conservação das águas (Pagiola; Von Glehn; Taffarello, 2013; SMMA, 2017). O objetivo do projeto foi melhorar a qualidade e quantidade das águas no município, por meio da adesão voluntária dos proprietários rurais (Pagiola; Von Glehn; Taffarello, 2013) que passaram a receber subsídios financeiros e econômicos. Por exemplo, a *The Nature Conservancy* (TNC) apoiou os proprietários rurais com cercamento de áreas, monitoramento e auxílio técnico. A SOS Mata Atlântica com o fornecimento de mudas de árvores nativas e apoio técnico. Já a prefeitura de Extrema efetuava os repasses financeiros referentes aos hectares mantidos e restaurados (Pagiola; Von Glehn; Taffarello, 2013). Assim, para este programa de PSA, o repasse está atrelado a área em hectare destinada ao fornecimento dos serviços ecossistêmicos relacionados à produção de água.

O projeto Conservador das Águas demonstrou a possibilidade de recuperações ambientais para o melhor fornecimento de serviços ecossistêmicos. Na sub-bacia das Posses, estimavam-se 5% da cobertura natural, anterior ao ano de implementação do programa (2005).

Contudo, em 2016 a área coberta com espécies de Mata Atlântica já havia atingido 30% da sub-bacia (Pereira *et al.*, 2016). Além dos benefícios com a produção de água, percebeu-se também a ampliação de outros serviços, como redução de erosões e aumento de espécies da fauna (SMMA, 2017). A água como serviço ecossistêmico principal em políticas de PSA possui maior relevância, na Mata Atlântica (Mota *et al.*, 2023; Pereira *et al.*, 2016), sobretudo pela diversificada rede hidrográfica e concentração populacional dependente desse recurso. Neste sentido, casos como o de Extrema/MG, alcançados devido ao envolvimento dos proprietários rurais, parcerias e governança devem servir de incentivo para outras localidades que buscam também melhorar os serviços ecossistêmicos.

Em mesma medida, faz-se importante ações que incentive a manutenção do carbono na biomassa florestal. O carbono inativo ao aquecimento global é um ativo financeiro para o mercado, por meio do crédito de carbono.

2.5.2. Crédito de Carbono

As florestas e os oceanos são grandes sumidouros do gás carbônico. Nos oceanos se encontra dissolvido entre as moléculas de água, sendo este o maior sumidouro natural (Sabine *et al.*, 2004). Na vegetação, o CO₂ participa do processo de fotossíntese, transformado em fonte energética agregado à biomassa, respondendo pelos maiores aprisionamentos terrestres para soluções climáticas naturais (Griscom *et al.*, 2017). Para a eficiência no processo de descarbonização, objetivando-se manter o controle climático, faz-se necessário a soma de distintas ações, desde a escala local àquelas de alta representatividade global (Farrell *et al.*, 2021; Harris; Gibbs, 2021; IPCC, 2021).

Um direcionamento importante ao contexto de combate climático foi o estabelecimento de acordos para a redução das emissões de GEE. Dentre as ações de redução, destacam-se aquelas de manutenção dos estoques de carbono, como a manutenção das reservas florestais (Griscom *et al.*, 2017; Harris *et al.*, 2021; Law *et al.*, 2018). Contudo, a manutenção das manchas florestais encontram diversas barreiras, como o desmatamento ilegal e a expansão de fronteiras agropecuárias (Oliveira *et al.*, 2013; Soares-Filho *et al.*, 2005, 2014). No Brasil, no ano de 2019 o país emitiu 2,18 bilhões de toneladas de CO₂e, sendo a mudança no uso da terra, no qual o desflorestamento é imperante e responsável por 44% (SEEG, 2022).

Em Minas Gerais, em 2022, as emissões pelo desmatamento atingiram 31,80 milhões de toneladas de CO₂e e a pecuária lançou 56,80 milhões de toneladas de CO₂e na atmosfera (SEEG, 2022). Nesse ano, a perda florestal exclusiva de Mata Atlântica gerou 7,40 mil hectares degradados, o que correspondeu a 10 milhões de toneladas de CO₂e liberados para a atmosfera, o que garantiu à Minas Gerais a primeira posição em perdas do bioma (SOSMA, 2022).

O cenário mundial de constantes avarias ecossistêmicas, sinalizavam a necessidade de novas ações por parte dos tomadores de decisões e pela sociedade, que possibilite a redução de perdas de carbono das floretas e solos para a atmosfera. Faz-se necessário também atenção ao carbono pedológico, uma vez que as florestas são também provedoras da matérias orgânicas que se agregam aos solos (Caldeira *et al*, 2008). Em grande medida o carbono no solo se encontra na forma de biomassa morta, húmus e outros agregados (Mantovani *et al*, 2024 & Caldeira *et al*, 2008), que é uma forma inativa ao aquecimento climático. A perda da cobertura vegetal, além da emissão direta de CO₂e para atmosfera, impacta na desagregação dos solos. Estes, quando expostos às ações intemperizantes e a processo de secagem, devido ao aquecimento, tornam-se fontes permutantes do carbono inativo em reativo, na forma de gás (Farooqi, 2022; Margulis, 2020).

Para a contenção do aumento do carbono reativo na atmosfera, bem como a manutenção da qualidade dos serviços ecossistêmicos locais, ações direcionadas à conservação florestal, bem como impulsionadoras à restauração florestal são importantes medidas mitigatórias, já discutidas em acordos do mercado de carbono. No Acordo de Paris em 2015, indicou-se a necessidade da regularização desse mercado. Todavia, devido aos empecilhos produtivos, a normalização do mercado global só foi alcançada no ano de 2021, durante a COP-26 (Russel; Crawley, 2021).

O mercado de carbono é constituído por duas modalidades: o mercado regulatório e o mercado voluntário. O regulatório é definido em acordo entre nações, que assinam compromisso de redução de suas emissões. Ainda se subdivide em dois caminhos: a taxação sobre as emissões e o comércio de emissões (*cap and trade*) (Jiang *et al*, 2023; Viri, 2020). Sobre o primeiro, cobra-se pelas emissões proporcionais a um dado produto ou serviço (consumidor pagador). Já o comércio de emissões é estabelecido pelo câmbio entre as cotas de carbono entre os entes participantes. Cada país estabelece cotas de carbono para os setores e entes em seu território. Se manter na cota ou abaixo dela é uma medida compulsória (Jiang *et*

al, 2023). Empresas que ultrapassarem em emissões, devem adquirir cotas de carbono daquelas com saldo positivo (Harris *et al.*, 2021). O mercado regulatório gerou no ano de 2020, 53 bilhões de dólares em negociações (BM, 2021). No caso do Brasil, o acordo assinado em Paris prevê uma redução de 37% das emissões até 2025, e 43% até 2030 (MMA, 2020). O mercado regulatório passou por uma remodelagem nos últimos anos, no qual iniciou em algumas permissões de porcentagens de compensação com cotas de carbono de mercado voluntário (*offset*), que variam entre 10% a 20% (Viri, 2020).

O mercado voluntário de carbono, diferente do regulatório, não há uma obrigatoriedade de participação. Apesar disso, torna-se cada vez mais acessado por empresas e pessoas que desejam vincular sua marca à causa ambiental positiva. O mercado voluntário movimenta entorno de 1% das negociações de carbono (Viri, 2020). Apesar da baixa parcela, possui um potencial elevado de crescimento, sobretudo com incentivos e leis internas que garantam sua projeção comercial. O país detém potencialidade de 15% do mercado voluntário que, estimou-se negociações próximas de 50 bilhões de dólares em 2023 (Blaufelder *et al*, 2022).

No Brasil, grande parcela dos 159 programas do mercado voluntário de carbono, são atrelados ao setor de energia, que corresponde 63%. Já os projetos ligados ao à alternativas de manejo agrícola, manutenção e restauração florestal; respondem por 25% (BCTP, 2022). Apesar dos projetos relacionados aos usos da terra serem em menor número, o volume de créditos de carbono gerado é mais expressivo quando comparado com o setor energético, sendo responsável por 65% dos créditos disponibilizados, com um crescimento em 2022 de 441% acima da média (BCTP, 2022). A disponibilização dos créditos de carbono perpassa com quatro fases: projeto inicial, validação, certificação e comercialização. Todas as fases seguindo padrões internacionais adaptados para o contexto local, caso seja necessário (Vargas *et al*, 2022). Para a confirmação de neutralização de emissões, deve-se formular um inventário de emissões, que confirme o balanço.

O Brasil possui um alto potencial para o mercado de carbono, sobretudo pelas reservas florestais existentes (MMA, 2020). A criação da CPR-V foi uma das ações motivadas a impulsionar o mercado voluntário de carbono no país, sobretudo em propriedades rurais. Instituiu-se que a preservação de áreas florestais e a restauração de novas, seriam o lastro para se emitir os créditos de carbono. O título, por sua vez deve possuir rastreabilidade e solidez para negociações, logo deve ser emitido por meio de entidades certificadoras (Brasil, 2021a).

Na prática funciona como qualquer crédito de carbono disponibilizado no mercado. A cada tonelada de CO₂e deixada de emitir pelo desmatamento ou introduzida ou estimada na biomassa florestal, por meio de recuperação de áreas, gera-se uma CPR-V.

Ainda existe uma discrepância entre os valores negociados pela tonelada de carbono no mercado regulatório e o mercado voluntário. O mercado regulatório é atrelado aos acordos climáticos, por vez possui maior peso nas transações. Já o voluntário é composto por entes que buscam neutralizar suas emissões (Ekko-Green, 2024; Blaufelder *et al*, 2022) e atrelar a sua marca ou propósito a uma ação alinhada com a sustentabilidade. Enquanto o valor médio da tonelada de carbono foi de 60 dólares em 2022; no mercado voluntário variou entre 10 a 12 dólares a tonelada para o mesmo período (Iccbrasil & Waycarbon, 2022). Apesar do valor inferior, o mercado voluntário demonstra crescimentos consideráveis, sendo o Brasil um protagonista.

A CPR-V pode atuar no cenário nacional como uma ferramenta de transação particularmente vantajosa, facilitando as interações entre produtores rurais e compradores de créditos de carbono. Como resultado, a CPR-V tem o potencial de impulsionar significativamente a manutenção de áreas florestais e a restauração de áreas improdutivas ou degradadas. Por outro lado, a CPR-V ainda é pouco divulgada entre os produtores rurais, que muitas vezes desconhecem seus benefícios. Além disso, a burocrática na emissão e gestão do título pode desestimular especialmente os pequenos produtores, que encontram dificuldades para cumprir as exigências de comprovação de práticas sustentáveis e obtenção de certificações ambientais. Por vez políticas de difusão e consultorias públicas coletivas podem ampliar a aderência à ferramenta ambiental. Outro passo importante será diagnosticar o quantitativo de carbono em manchas florestais, como forma de incentivo aos produtores, que poderão disponibilizá-los ao mercado.

2.5.2.1. Quantitativo de carbono nas manchas florestais de Mata Atlântica

A Mata Atlântica está entre os biomas do planeta com maior biodiversidade. Em sua formação original, foi o segundo bioma Brasileiro em extensão territorial e concentração de biomassa florestal (Lopes *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2009). Destaca-se também pela expressividade rede hídrica, responsável pelo abastecimento de grande parte da população urbana Brasileira (Solorzano; Rogério; Brasil, 2021). Apesar de sua importância à

sobrevivência de espécies, inclusive do próprio homem, sofre históricas reduções das áreas florestais, fato este que lhe atribui a posição de bioma mais devastado do território Brasileiro (Diniz; Coelho; Cuervo, 2022; Pinto; Bede, 2006; Rezende *et al.*, 2018). Estudos demonstram quantitativos variantes de Mata Atlântica no território nacional, com oscilações entre 11% a 16% (Ribeiro *et al.*, 2009). Pesquisa mais recentes, com uso de imagens de satélite com resolução do pixel de 5 metros, trazem resultados mais otimistas, com 26% da formação florestal (Rezende *et al.*, 2018). O percentual nas últimas décadas foi elevado por iniciativas de restauração do bioma. Mesmo assim, o bioma em alta degradação é um *hotspot* mundial de grande ameaça a extinção de espécies (Mittermeier *et al.*, 2004; Pinto; Bede, 2006; Rezende *et al.*, 2018).

O desflorestamento da Mata Atlântica foi um processo herdado desde o Brasil colônia. Os distintos momentos econômicos vivenciados no Brasil (pau-Brasil, cana-de-açúcar, mineração, café e pecuária), concentraram majoritariamente sobre as formações florestais de Mata Atlântica (Pinto *et al.*, 2006). Consequência disso, sobre o bioma, fundaram-se os principais centros urbanos do país.

Atualmente, a Mata Atlântica é representada por alta intensidade de fragmentação. Registra-se que mais de 80% dos fragmentos restantes são menores que 50 hectares (RIBEIRO *et al.*, 2009). Apesar da importância do bioma, apenas 9,1% das manchas de florestais são constituídas em UC públicas e privadas. Deste montante, 2% estão em UC de proteção integral (SILVA *et al.*, 2016).

Na Zona da Mata mineira, o PESB se destaca por sua composição florestal. Na UC se verifica um processo de regeneração contínuo do bioma, bem como o aumento de espécies (IEF, 2007a). Para os fins da pesquisa, considerou-se como cobertura florestal de Mata Atlântica tanto as formações originais remanescentes quanto as formações secundárias surgidas por colonização espontânea ou por restauração ativa.

O PESB, ressalta-se também pela manutenção de nascentes contributivas para as bacias do rio Doce e rio Paraíba do Sul (IEF, 2007a), importantes rios para o abastecimento humano, agricultura e pecuária. Em contrapartida, a zona de amortecimento do entorno do PESB apresenta elevada hemerobia, com manchas florestais esparsadas. Hemerobia é utilizado para descrever o grau de alteração ou influência humana em um ecossistema ou habitat natural (Lausch *et al.*, 2015).

Os usos da terra, no entorno do PESB, para fins socioeconômicos, proporcionaram substancial substituição da cobertura natural. Como pontuado anteriormente, a pastagem se tornou preponderante, sendo esta uma barreira para a comunicação entre a UC e manchas externas.

Em um consenso estratégico mundial, verificou-se que para a efetiva proteção dos biomas, torna-se indispensável a participação dos *stakeholders*. Faz-se necessário o envolvimento ativo dos atores locais, quando promotores de mudanças dos usos da terra. As florestas necessitam ser compreendidas como um importante ativo, que influenciará positivamente na atividade agropecuária, aumento da biodiversidade local, resiliência do solo, produção de água, dentre outros benefícios (Ramos; Nuvoloni; Lopes, 2021). Neste contexto, os fragmentos de Mata Atlântica devem ser valorizados e valorados. A valoração incentiva a manutenção da floresta em pé, possibilita ao proprietário rural acesso a subsídios financeiros e econômicos, por meio de programas de PSA. Dentre as políticas em âmbito internacional e nacional, chama-se atenção para a o mercado de carbono, visualizado como impulsionador da manutenção e restauração florestal (Brasil, 2021a; Farrell *et al.*, 2021).

A obtenção do quantitativo de carbono em formações vegetais pode ser feita por método direto ou indireto. O método direto consiste em efetuar o corte, pesagem e análise das partes de uma árvore (Watzlawick; Kirchner; Sanquetta, 2009). Já o método indireto pode ser feito por estimativas de imagens de satélite ou funções alométricas (Sanquetta *et al.*, 2014).

O estoque de carbono está relacionado à biomassa das espécies florestais, logo possui distintos valores em uma paisagem. Por exemplo, um estudo de Sanquetta *et al* (2002) sobre o carbono na Mata Atlântica apresentou que, para um estágio inicial a concentração média de carbono é 29 tc ha⁻¹; para espécies em estágio intermediário 71 tc ha⁻¹ e aquelas em estágio avançado de recuperação 165 tc ha⁻¹. Britez *et al* (2006) obtiveram uma valores médios de 108 tc ha⁻¹ para Floresta Estacional Semidecidual. Pesquisas relacionadas ao estoque médio de carbono na Zona da Mata mineira, onde se encontra o PESB, expuseram concentrações de carbono que variavam de acordo com as espécies e período de restauração. Também se registra o valor médio de 108 tc ha⁻¹ para uma floresta em estágio de recuperação (Amaro, 2010).

As diferentes fases de desenvolvimento das manchas florestais, associadas a outros componentes espaciais, definem a composição da paisagem na área de estudo. Esta paisagem é heterogênea, sendo composta por diversos usos da terra.

2.6. Composições da paisagem

A paisagem é composta por um mosaico heterogêneo de estruturas (formas) que se interconectam e produzem processos espaciais (funções), inerentes ao ordenamento espacial e ao homem (Metzger, 2001). As métricas da paisagem são ferramentas que subsidiam o estudo da relação entre os usos da terra, por meio de padrões observados (Lausch; Herzog, 2002; Lin *et al.*, 2020; Sowińska-Świerkosz; Soszyński, 2014).

Com base nos *outputs* das métricas utilizadas, avaliam-se as formas, que em uma escala temporal, possibilita a compreensão das funções, apontadas em perdas e ganhos, ambos resultantes de mudanças (Lang & Blaschke, 2020). Os elementos espaciais, sob a ótica da Ecologia da Paisagem, organizam-se em manchas, corredores e matriz (*Patch-Corridor-Matrix: PCM*) (Lausch *et al.*, 2015) que são componentes básicos que modelam as paisagens (Forman & Godron, 1986).

A matriz é a entidade dominante, que envolve as manchas e corredores, sendo composta por um elemento natural ou antrópico. Dentre suas principais características, pode-se citar: ocupa a maior área relativa da paisagem; possui maior grau de conectividade com os demais elementos e; exerce influência direta sobre os fluxos (Lang & Blaschke, 2020). Neste caso, a matriz pode demonstrar características de impermeabilidade, atuando como uma barreira entre os fragmentos florestais (Martensen; Pimentel; Metzger, 2008). Na área de pesquisa, no entorno do PESB, a matriz é representada por extensas áreas de pasto, proveniente da substituição das florestas naturais, sobretudo para fins agropecuários.

As manchas ou fragmentos, por sua vez, representam os distintos usos da terra, como manchas florestais, urbanas, manchas de áreas agricultáveis, dentre outras. As manchas são as menores unidades do mosaico da paisagem (Lang & Blaschke, 2020). Quando segregadas, reduzem drasticamente seu potencial biogênico, por vez, conexões são necessárias para que haja dinâmica entre espécies.

Outro elemento de importância para a análise espacial são os corredores. Estes, em meio a uma matriz, podem possibilitar interação ou mesmo maior segregação, a depender do contexto que se encontra (Forman & Godron, 1986). Por exemplo, entre manchas florestais, um corredor formado por espécies nativas da região, contribuirá com o fluxo gênico. Em contrapartida, caso o corredor seja formado por espécies exóticas, poderá agir como um obstáculo (Sowińska-Świerkosz; Soszyński, 2014; Wang *et al.*, 2022).

A conectividade entre as manchas e corredores é crucial para a sobrevivência das espécies e manutenção de serviços ecossistêmicos (Martensen; Pimentel; Metzger, 2008; Wang *et al.*, 2022). A fragmentação, ao contrário, caracteriza-se pela quebra de formações homogêneas em áreas de menor tamanho (Mcgarigal, 2015). O processo de fragmentação pode ocasionar o isolamento das espécies, e mesmo o desaparecimento por completo do fragmento, devido ao efeito de borda (Wei *et al.*, 2022).

O efeito de borda constitui um fenômeno preocupante na Ecologia da Paisagem, especialmente ao analisar as dinâmicas ecológicas de formações florestais. Esse efeito refere-se às alterações ambientais, bióticas e abióticas, que ocorrem nas margens de uma formação florestal, onde ocorre interação com ambientes adjacentes não florestais ou com paisagens modificadas pelo homem (Laurance *et al.*, 2007). As bordas da floresta apresentam condições ecológicas distintas do interior da mesma, incluindo variações de luminosidade, umidade, temperatura e composição de espécies, o que pode afetar significativamente a distribuição e o comportamento da flora e fauna locais. Além disso, o efeito de borda pode intensificar a vulnerabilidade da floresta a invasões biológicas, incêndios e outras perturbações, comprometendo a biodiversidade e as funções ecossistêmicas. A avaliação desses efeitos é essencial para o desenvolvimento de estratégias de conservação e manejo que minimizem impactos negativos nas formações florestais e promovam a conectividade e resiliência dos ecossistemas diante das mudanças ambientais globais. O monitoramento constante das alterações em fragmentos em regiões com alto grau de atuação da agropecuária, torna-se importante para que não se atinja o ponto de inflexão, potencializado pelo efeito de borda.

A matriz em ambiente rural, não deveria ser um ambiente hostil para os fragmentos florestais. Posturas clássicas de produção agrícola, ainda imperantes em propriedades rurais brasileiras, expõem prerrogativas de aumento da produção às custas do desflorestamento (Assunção; Gandour; Rocha, 2015; Carvalho-Ribeiro *et al.*, 2020; Rosano-Peña *et al.*, 2014; Soares-Filho *et al.*, 2014). Nesta perspectiva, áreas produtoras adquirem caráter de repulsão perante as formações naturais. No entanto, boas práticas para o uso da terra, já são atingidas no cenário agrícola brasileiro (EMBRAPA, 2022; PBMC, 2014). Práticas essas que associam a produção e conservação da biodiversidade (Vandermeer; Perfecto, 2007).

O PCM é o modelo adequado para análise espacial de paisagens com grande influência antrópica (hemerobia) (Lausch *et al.*, 2015), como no entorno do PESB. Em paisagens com

elevada hemerobia, torna-se importante ponderações e discussões sobre os processos econômicos atuantes no território, pois estes são impulsionadores de mudanças quanto ao uso da terra (Metzger, 2001). Neste contexto, o uso de métricas da paisagem permite cotejar a evolução espacial, em termos quantitativos, que criam subsídios para análises qualitativas dos aspectos ambientais e socioculturais (Vandermeer; Perfecto, 2007; Xia *et al.*, 2021).

Há diferentes métodos e metodologias de modelagem que possibilitam analisar mudanças espaciais. Nessa pesquisa, considerados os objetivos propostos, fez-se a opção por utilizar modelos determinísticos e probabilísticos. Nos itens a seguir, apresentamos a definição e os conceitos que envolvem cada um desses modelos, bem como vantagens de utilização no contexto da análise espacial.

2.7. Características essenciais dos modelos

Um modelo é uma representação simplificada e objetiva da realidade, moldada a partir de uma perspectiva particular, baseada em um paradigma. De acordo com Grimm & Railsback (2005); Lambin (1997) e Schweitzer (2003), os modelos são caracterizados por vários atributos distintos, dos quais podem-se destacar:

Seletividade: modelos são projetados para focar em variáveis específicas que são críticas para o objetivo do estudo, eliminando ou abstraindo variáveis menos relevantes para reduzir a complexidade sem perder a essência do fenômeno modelado.

Enunciativo: modelos frequentemente incorporam hipóteses baseadas em teorias e evidências anteriores, permitindo previsões *ex-ante* de fenômenos. Essa característica é fundamental para o *design* experimental.

Simplicidade: um princípio bem conhecido em modelagem é a "navalha de Occam", que prefere a simplicidade na presença de múltiplas hipóteses plausíveis. A simplicidade ajuda a evitar o "overfitting", garantindo que o modelo capture apenas as relações mais significativas.

Analogia: modelos frequentemente usam analogias para representar sistemas complexos de uma maneira mais compreensível, usando estruturas familiares ou sistemas para explicar conceitos desconhecidos. Essa técnica é amplamente utilizada em educação e comunicação científica para ajudar na visualização e entendimento.

Replicabilidade: a capacidade de aplicar um modelo em contextos variados é uma forte indicação de sua robustez. Modelos replicáveis ajudam a verificar teorias em diferentes condições e a generalizar resultados.

Condensação: modelos eficientemente condensam informações complexas em representações reduzidas, facilitando a análise e interpretação. Essa compressão de dados é crucial em campos como a ciências ambientais e a biologia de sistemas, onde se variam escalas temporais e espaciais.

Estruturação: a estrutura de um modelo, inclui conexões e *feedbacks*, que auxiliam na captura da dinâmica do sistema modelado. A teoria dos sistemas dinâmicos, oferece uma visão aprofundada de como essas estruturas podem ser modeladas e entendidas.

Comunicativo: modelos são ferramentas importantes para comunicação de ideias complexas, servindo como pontes entre teoria e prática e entre diferentes disciplinas. Esse aspecto é especialmente valorizado na educação científica e na tomada de decisões políticas, onde a clareza e a precisão são necessárias.

Antecipativo: A habilidade de um modelo para criar prognósticos de cenários futuros é uma de suas funções mais valiosas, permitindo planejamento e prevenção baseados em evidências.

Para garantir a adequada aplicação dos modelos probabilísticos na análise dos diferentes *drivers* que influenciam as mudanças na paisagem, é essencial entender o conceito de cenários. Cenários permitem aos pesquisadores e planejadores explorar uma variedade de futuros potenciais e suas consequências, facilitando assim a compreensão das complexas interações e relações entre os elementos da paisagem e os impactos potenciais de diferentes decisões ou eventos.

2.8. Cenários e perspectivas para a paisagem na modelagem

Cenários são usados como ferramentas para expandir o entendimento sobre o ordenamento espacial. Junto a isso, sua concepção possibilita interpretar futuras configurações da paisagem e identificar elementos e processos imperantes. Cenários são histórias possíveis sobre desdobramentos para o futuro, não podendo ser confundidos com previsões, pois possuem

uma lógica consistente para sua composição (Aguilar *et al.*, 2020; Börjeson *et al.*, 2006; IPBES, 2016b; Iversen, 2006).

A abordagem dos cenários ganhou notoriedade ao planejamento e gestão de recursos ambientais. Existem distintos tipos de cenários que são discutidos e aplicados em estudos (Börjeson *et al.*, 2006). Mas em grande medida, todos os conceitos permeiam os propósitos de cenários preditos, exploratórios e normativos. Para os fins da pesquisa, optou-se pela projeção dos cenários preditivo e exploratório. A comparação entre ambos permite avaliar as possibilidades de mudanças na paisagem e seus desdobramentos nos aspectos ambientais, sociais e econômicos.

O cenário predito é pautado por estruturas e funções reconhecíveis na paisagem. Logo, projeta-se para o futuro uma tendência observada no presente e comparada ao passado. Este modelo de cenário é importante para se estimar como estará o ordenamento espacial, caso não haja interferências de novas forças definidoras (Börjeson *et al.*, 2006). A resposta de cenários preditos dá base para possíveis estratégias para manutenção ou mudança. No caso da pesquisa desenvolvida, o cenário predito será aquele representado pelo modelo com a tendência da relação entre Mata Atlântica, pasto, agricultura e agricultura para o ano de 2050.

O cenário exploratório foca em situações que possam acontecer ou desejosas, como por exemplo a criação de uma UC. Elementos como políticas nacionais e internacionais (Börjeson *et al.*, 2006), como as leis de PSA e geração de CPR-V, podem ser importantes indutores para mudanças positivas. Para a pesquisa, tem-se como hipótese que as áreas prioritárias à restauração ativa, identificadas pelo método AHP-CLP, serão importantes *feedbacks* positivos para a indução de novas composições florestais, que surgirão espontaneamente para 2050.

Para maior aprofundamento nos conceitos basilares utilizados no estudo, faz-se necessário melhor descrição dos modelos utilizados para a produção dos resultados e análises. Em sequência, tem-se a exposição sobre a modelagem determinística (AHP-CLP) e a modelagem probabilística (dinâmica).

2.9. Modelagem determinística AHP-CLP

Os pilares conceituais para o desenvolvimento de um modelo devem ser focados em um tema específico, bem definido pelo modelador. A partir dele, foca-se em buscar sintetizar determinadas relações complexas, transformando-as em resultados compreensíveis e passíveis de decisões, com maior grau de assertividade (Araujo *et al.*, 2007; Soares-Filho; Rodrigues; Follador, 2013). A análise multicritério (AMC), por exemplo, é uma das formas de modelagem determinística, para soluções pertinentes às alterações de uso da terra, devido sua capacidade de incorporar características estruturais de composição da paisagem (Vettorazzi; Valente, 2016). O Processo Analítico de Hierarquia ou AHP (*Analytic Hierarchy Process*), por sua vez, é um método matemático desenvolvido por Thomas Saaty no final da década de 1970 (Saaty, 1977). Permite comparar critérios ou variáveis, estabelecendo-se uma hierarquia de prioridades, por meio de procedimentos cognitivos, baseado em especialistas (Chandio *et al.*, 2013; Saaty, 1990). A comparação pareada entre os critérios é feita com base nos valores da Escala Fundamental desenvolvida por Saaty, sendo os resultados evidenciados em uma matriz quadrada (Malczewski, 2004; Saaty, 1990). Os *inputs* do modelo podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa, espaciais ou não-espaciais, que assimilados em conjunto, possibilitam uma síntese da realidade observada (Malczewski, 2004; Saaty, 1990). Por meio da AHP, tem-se a possibilidade de integrar conhecimentos técnicos e resultados empíricos, de forma a se visualizar respostas apuradas das interações espaciais (Vettorazzi; Valente, 2016).

A CLP (*Weighted Linear Combination*) é o método em AMC com maior aplicação em distintas investigações, sobretudo em conjunto com a AHP. Por meio do CLP, obtém-se uma operação resultante de funções de análise espacial, provenientes dos critérios selecionados na matriz de comparação e seus respectivos pesos (CHANDIO *et al.*, 2013; VALENTE; PETEAN; VETTORAZZI, 2017).

A AHP-CLP é aplicada para a solução de problemas espaciais complexos, como desflorestamento, expansão urbana, perda de solos, inundação dentre outros (Awad; Jung, 2022; Barreto *et al.*, 2021; Das, 2020; Dağidir & Özkan, 2024; Garrote; Guti, 2019; Kangas, 1993; Khan *et al.*, 2024; Sacchis; Kozhikkodan; Lüderitz, 2021; Shale *et al.*, 2020; Sinshaw *et al.*, 2021; Risky *et al.* (2024); Vettorazzi, 2006; Vettorazzi; Valente, 2016; Wu; Chen; Lu, 2022). Cada critério ainda pode ser composto por subcritérios, que influenciam na resposta final, expressa em modelos espacialmente explícitos e/ou mapas temáticos.

Outro padrão de modelos espaciais são os modelos dinâmicos. A modelagem dinâmica é caracterizada pela capacidade de simular mudanças nos usos da terra ao longo do tempo, considerando uma série de condicionantes probabilísticos. Esses modelos são fundamentais para entender a dinâmica espacial e temporal dos processos de mudança na paisagem, permitindo a formulação de cenários futuros com base em variáveis socioeconômicas, ambientais e políticas. Além disso, a modelagem dinâmica é útil para avaliar os impactos potenciais de diferentes políticas de uso da terra, auxiliando na tomada de decisões para a gestão territorial.

2.10. Modelagem dinâmica dos usos da terra

As paisagens são composições complexas dotadas de diversos elementos e fluxos. A relação entre os elementos e fluxos no tempo, possibilitam novas configurações da paisagem demarcadas por estruturas, que são testemunhos das alterações ocorridas no espaço e no tempo (Christofoletti, 1999).

Dada a complexidade da paisagem, as ciências de cunho espacial buscaram distintas ferramentas que auxiliem na medição e leitura dos fenômenos. Dentre os procedimentos metodológicos de aplicação prática, os modelos adquiriram importante função (Benjamin *et al.*, 1998). Os modelos dinâmicos buscam representar, uma visão específica sobre interações espaciais, sendo eles elaborados com base em observações dos fenômenos, questionamentos e hipóteses (Christofoletti, 1999; Soares-Filho, 1998). Portanto, os modelos são construídos de acordo com o processo investigativo do observador e sua visão de mundo. Segundo Christofoletti (1999), a forma como percebemos e entendemos a natureza influencia diretamente nossas explicações, características, funcionamentos, uso e percepção dos riscos relacionados a eventos ambientais, moldando, assim, nossas decisões e atitudes.

Um modelo é categorizado pela reprodução da dinâmica sistêmica, em ambiente computacional, com a captação dos elementos e suas trocas de energia, de maneira a se compreender os processos e possíveis simulações (Soares-Filho *et al.*, 2007; Soares-Filho; Rodrigues; Follador, 2013). Os modelos espaciais dinâmicos têm auxiliado em tomadas de decisões, por meio da síntese coerente espaço-temporal, transcendendo-se a estaticidade de mapas convencionais (Almeida, C., 2003). Contudo cabe destacar que a função de um modelo

não é de prever o futuro, mas sim expor as tendências simuladas, com base em condicionantes espaciais do presente, apoiados em critérios matemáticos que permitam quantificar e qualificar determinados fenômenos.

Os modelos de simulação são baseados em certos paradigmas, ou pilares de concepção compostos por agentes, processos e autômatos celulares. Os modelos de simulação ambiental oferecem abordagens diversas para entender comportamentos em sistemas complexos, como ecossistemas, atmosfera, ou interações humanas com o ambiente. Cada paradigma traz uma perspectiva única para a modelagem de sistemas e processos ambientais.

Os modelos baseados em agentes (ABMs) caracterizam-se pela simulação de entidades autônomas, denominadas agentes, que interagem entre si e com seu ambiente. Esses modelos são particularmente úteis para explorar como os comportamentos individuais podem levar a fenômenos emergentes em nível de sistema (Soares-Filho *et al.*, 2007; Verburg *et al.*, 2004). Por exemplo, pode-se modelar como diferentes espécies de animais competem por recursos em um ecossistema, ou como decisões individuais afetam o uso de recursos naturais em uma comunidade.

Modelos baseados em processos focam na simulação de procedimentos dinâmicos e suas interações. Frequentemente utilizados em estudos hidrológicos, climáticos e ecossistêmicos, esses modelos integram equações diferenciais para representar os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no ambiente. Permitem que pesquisadores investiguem os efeitos de diferentes variáveis ambientais sobre processos específicos, como a decomposição de matéria orgânica ou a dinâmica de nutrientes em lagos e rios (Bonabeau, 2002; Verburg *et al.*, 2004).

Autômatos celulares são modelos matemáticos usados para simular sistemas complexos, compostos por uma grade de células onde cada célula pode assumir diferentes estados e mudar conforme regras específicas, geralmente baseadas nos estados das células vizinhas. É especialmente eficaz para simular padrões espaciais e temporais de processos ecológicos ou fenômenos de propagação, como incêndios florestais ou a expansão de doenças em uma população vegetal. O movimento celular é condicionado ao estado prévio da célula e o arranjo que possui com as células adjacentes, tendo assim uma atualização temporal, comportando-se como sistemas dinâmicos (Balzter, *et al.*, 1998; Soares-Filho *et al.*, 2007).

Os autômatos celulares são úteis às simulações de uso e cobertura da terra, como o elaborado nesta pesquisa. Foram difundidos com o Jogo da Vida (*The Game of Life*) que possui funcionalidade sobre regras para estados aleatórios da organização celular (Wolfram, 1982). O estado de uma célula em estar “viva” ou “morta”, depende da influência de sua vizinhança. Ou seja, entes próximos tendem a ter características semelhantes do que aqueles mais distantes. Os autômatos celulares adquirem importância em modelos ambientais, devido ao comportamento animado que as células adquirem características semelhantes à realidade (Soares-Filho *et al.*, 2004).

A dinâmica dos autômatos celulares, ao modificar continuamente a configuração espacial das células, permite a composição de cenários diversos e detalhados para a análise de sistemas complexos e a previsão de suas evoluções futuras. O desenvolvimento dos modelos propostos, bem como a projeção dos cenários, foram concebidos no software Dinâmica EGO 7.4.0 desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) (CSR, 2023).

2.11. Dinâmica EGO

O software Dinâmica EGO é uma plataforma avançada para a modelagem de mudanças no uso e cobertura da terra. EGO, que significa "Evironmet for Geoprocessing Objects", reflete a integração de componentes ecológicos, geográficos e operacionais na análise das dinâmicas ambientais. A versão 7.4.0 deste software emprega uma combinação de autômatos celulares, projeções Markovianas teoria dos grafos e modelagem estatística que auxiliam no processo de simular cenários futuros baseados em tendências históricas e variáveis condicionantes (CSR, 2023). Com uma interface gráfica intuitiva e capacidades de visualização de dados robustas, o Dinâmica EGO é ideal para analisar processos complexos de mudança de uso da terra, como desmatamento, regeneração florestal e expansão urbana.

As projeções Markovianas no software são importantes, especialmente devido à capacidade desse tipo de modelo de incorporar a incerteza e a dependência temporal nos processos de transição de estados. No contexto do uso e da mudança da terra, emprega cadeias de Markov para modelar como diferentes tipos de usos, como áreas urbanas, agrícolas ou florestais, podem mudar ao longo do tempo baseado em probabilidades de transição. Essas

probabilidades são determinadas a partir de dados históricos e podem ser ajustadas para incorporar variáveis socioeconômicas, políticas, ambientais ou climáticas em cada período de transição.

A teoria dos grafos é fundamental no software Dinâmica EGO, especialmente pois em modelagem ambiental a informação chega em um ponto e perpassa por caminhos de nós no grafo, atingindo-se a outro ponto, podendo ser uma nova informação ou não (Rodrigues *et al.*, 2007). Utilizando essa abordagem matemática, é possível modelar e analisar diferentes áreas que interagem. A aplicação da teoria dos grafos permite não apenas visualizar essas transições, mas também analisar padrões de propagação e influência, como a velocidade da urbanização e seus impactos em áreas adjacentes.

A dinâmica do software Dinâmica EGO, baseia-se em definir condições iniciais do terreno e regras probabilísticas de transição de mudanças, que considerem fatores ambientais e socioeconômicos locais, como proximidade de rodovias e áreas protegidas. Essas regras permitem realizar análises e fazer antevisões. Além disso, o software incorpora *feedbacks* dinâmicos entre os diversos componentes do sistema modelado, o que é fundamental para entender as interações complexas em paisagens que estão em constante transformação. Essa funcionalidade é especialmente útil para avaliar o impacto de políticas de gestão territorial, exemplificado pela análise dos efeitos da integração de áreas prioritárias para restauração, como apresentado no estudo.

O software é dotado de uma gama de ferramentas que possibilitam uma modelagem ambiental talhada. Entre suas funcionalidades, destaca-se o uso de “funtores”, que são funções personalizáveis utilizadas para calcular transições entre diferentes estados de uso da terra. Destacam-se também os “containers” que são formados por conjuntos de “funtores” (Rodrigues & Soares-Filho, 2007). Com isso, o software permite a criação de “submodelos”, que são essencialmente modelos dentro de outros modelos, possibilitando aos usuários simular múltiplas interações e processos em diferentes escalas espaciais e temporais simultaneamente. A capacidade de realizar repetições de simulações é outro aspecto importante, que oferece a oportunidade de avaliar a consistência e a variabilidade dos resultados das simulações. Por fim, o Dinâmica EGO inclui módulos para a análise estatística, que facilitam a interpretação dos dados e o teste de diferentes cenários de intervenção. Essas ferramentas juntas fornecem uma

plataforma consistente, que auxilia na compreensão das mudanças no uso e cobertura da terra, apoiando decisões baseadas em evidências para gestão ambiental e planejamento territorial.

O Dinâmica EGO tem sido utilizado em estudos relevantes. O software inclui modelos especializados, destacando-se o SimMadeira, que avalia cenários de extração madeireira na Amazônia; o SimAmazônia, dedicado à simulação de desmatamento; e o Biodinâmica, que oferece um conjunto de ferramentas específicas para estudos de biodiversidade. Esses modelos e outros são exemplos de como o software pode ser adaptado para atender a necessidades específicas de pesquisa e planejamento ambiental. Para maiores informações, bem como outras funcionalidades do Dinâmica EGO, além de instruções para o download do software disponibilizado sem custo, os usuários podem acessar o site oficial pelo endereço eletrônico <https://csr.ufmg.br/dinamica/>.

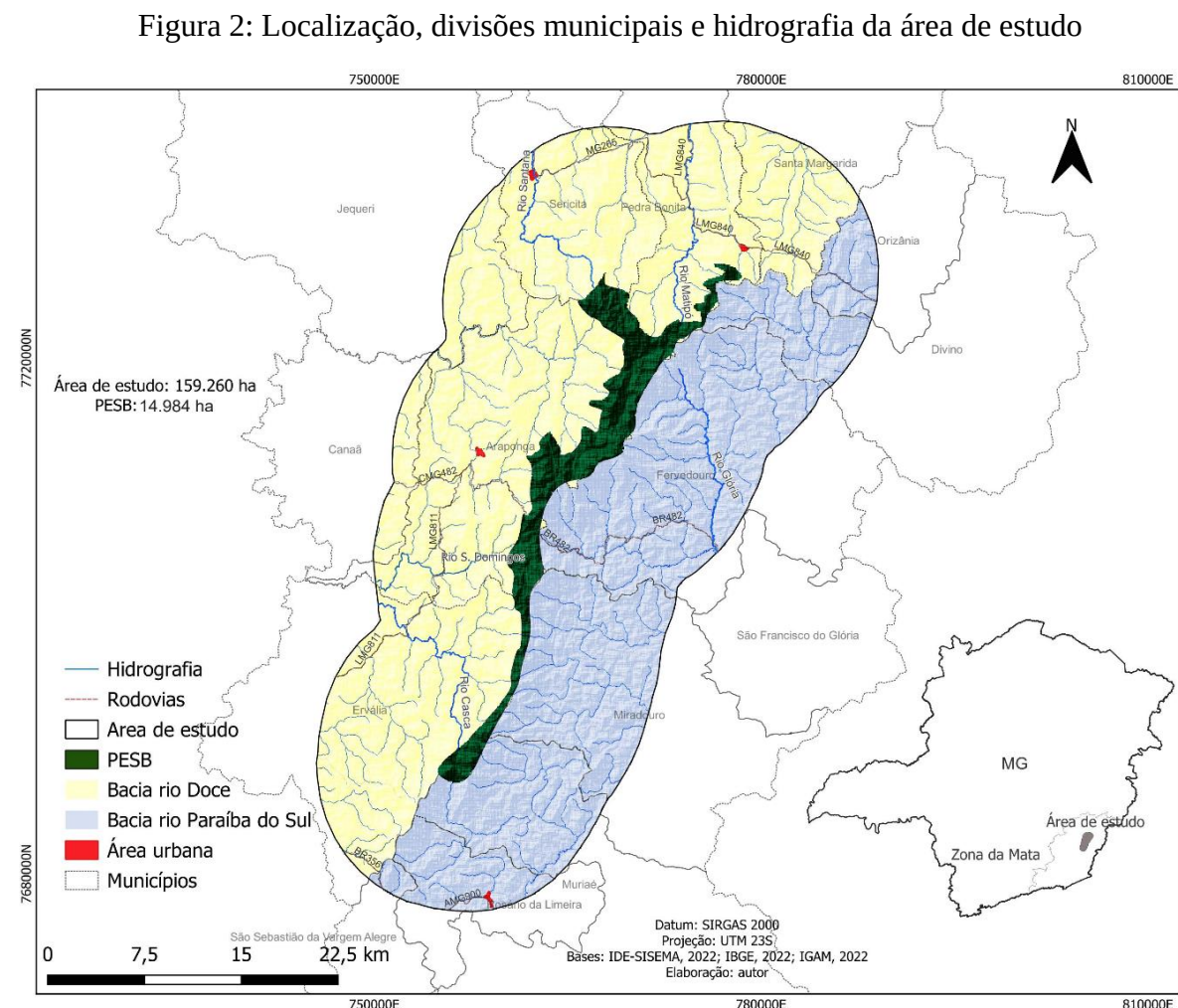
3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS: ÁREA DE ESTUDO, BASE DE DADOS E MÉTODOS

Nesse capítulo foram trazidos os elementos necessários para a efetivação desta pesquisa, com o cumprimento dos objetivos estabelecidos. Inicialmente, fez-se uma caracterização da área investigada, com sua localização, aspectos físicos, fitofisionômicos e socioeconômicos. Em seguida, descreveu-se as bases de dados utilizadas para a produção das variáveis selecionadas em cada fase metodológica. Por fim, apresentaram-se as três etapas de investigação espacial, que compõem os procedimentos metodológicos. São elas: i) Diagnóstico da paisagem, ii) Modelagem determinística e iii) Modelagem dinâmica probabilística.

Importante destacar que alguns conceitos fundamentais dos temas mencionados anteriormente, que originalmente poderiam estar no capítulo de referencial teórico, foram incluídos neste capítulo, juntamente com as descrições de cada método. Essa decisão foi tomada para garantir uma leitura com maior fluidez.

3.1. Área de estudo

A área de estudo, composta pelo PESB e respectiva zona de amortecimento, possui 159.260 ha, com alcance em 15 municípios em Minas Gerais (Santa Margarida, Jequeri, Pedra Bonita, Sericita, Orizania, Divino, Araponga, Fervedouro, Canaã, São Francisco do Glória, Miradouro, Ervália, Muriaé, Rosário da Limeira e São Sebastião da Vargem Alegre) (IEF, 2007a). Está localizada na porção oriental do estado, na mesorregião da Zona da Mata mineira, no bioma de Mata Atlântica. Comporta parte de duas importantes bacias hidrográficas: do rio Doce e rio Paraíba do Sul, sendo a morfologia do parque um expressivo divisor da drenagem (Figura 2).



Fonte: Elaboração própria.

O parque possui área de 14.984 ha, com destaque às formações florestais de Mata Atlântica e campos de altitude (IEF, 2007a). Apesar da relevante composição florestal, sendo um dos últimos fragmentos de Mata Atlântica com grande extensão de florestas contínuas, a maioria são formações secundárias. A pecuária e a cafeicultura foram as atividades responsáveis pelo desflorestamento no passado, sobretudo em áreas com menor declividade (IEF, 2007a). O abandono das terras para usos econômicos, condicionou a restauração passiva das áreas anteriormente à constituição da UC.

O PESB possui unidades geomorfológicas heterogêneas, sustentadas por um arcabouço geológico constituído de migmatitos e charnquitos, do Grupo Juiz de Fora. Sobre tais rochas, processos denudacionais esculpiram as movimentadas formas de relevo, características da Serra

da Mantiqueira, com presenças de serras íngremes, vales encaixados e planaltos dissecados (IEF, 2007a).

As cristas serranas estão em altitude entre 1.580 a 1.985 metros, com exemplares destacados na paisagem, como o Pico de Soares (1.985 metros). Essas unidades geomorfológicas, compõem as linhas de interflúvio e são recobertas, em sua maioria, por campos de altitude. Os escarpamentos constituem a unidade geomorfológica sequencial às cristas serranas. Localizam-se em altitudes entre 1400 a 1900 metros e apresentam declividade acima de 50%. Os solos característicos dessa unidade são cambissolos e neossolos recobertos por formações transicionais entre os campos de altitude e as florestas ombrófilas (IEF, 2007a). As encostas montanhosas estão em altitude média de 1.300 metros, tendo o cambissolos úmido em maior proporção. Os solos são recobertos por florestas ombrófilas, condicionadas por umidade orográfica. Já em áreas limítrofes do parque, verificam-se planaltos dissecados com altitude média de 950 metros. Predominam latossolos profundos recobertos por florestas em restauração (IEF, 2007a).

No exterior do parque está a zona de amortecimento com 144.276 ha. Uma zona de amortecimento, como estabelecido em lei, são áreas onde atividades humanas estão sujeitas a normas e restrições, com o objetivo de reduzir impactos sobre as UCs (Brasil, 2000). De acordo com o Plano de Manejo do PESB, a zona de amortecimento estabelecida foi de 10 km. Sedes municipais com buffer de um quilômetro foram excluídas (IEF, 2007b), sendo elas quatro: Araponga (leste); Sericita, Pedra Bonita (norte) e Rosário da Limeira (sul) (Figura 2).

A unidade geomorfológica de maior presença nessa área são os planaltos dissecados esculpidos em latossolos. O esvaziamento geoquímico e a erosão diferencial produziram a configuração de mares-de-morro (Pacheco *et al.*, 2018) com altitude média de 850 metros. A composição da fitofisionomia predominante é representada pela floresta estacional semidecidual montana, atualmente com parcelas de degradação (Meira-Neto; Martins, 2002), com exemplares espalhados pelas propriedades rurais do entorno do parque. Muitas delas compõem áreas de proteção estabelecidas em lei, como APP e RL (Brasil, 2012).

A paisagem da zona de amortecimento é predominantemente rural, composta em maior parcela por propriedades rurais familiares (IEF, 2007a). As principais atividades socioeconômicas estão ligadas à agropecuária, com a criação de gado, cultivo de café, feijão, milho, banana dentre outros plantios (IBGE, 2022). O café ganhou notoriedade no mercado

econômico, devido a qualidade mantida no grão após o processamento. Apesar disso, as maiores área do entorno estão recobertas por pastagem (IEF, 2007b), condicionadas pela supressão das árvores para expansão de área produtiva e pelo manejo do fogo, para limpeza de terrenos (Bonfim, 2001; IEF, 2007a). Também se faz presente minerações de bauxita, com cavas localizadas ao sul, leste e norte do parque (IEF, 2007a), sendo a Companhia Brasileira de Alumínio -CBA a mineradora de maior atuação na região (IBGE, 2022). Ao todo existem 7.751 propriedades rurais, sendo que 6.625 (85%) possuem área menor que 1 módulo fiscal. Já as propriedades classificadas como pequenas, ou seja, aquela com menos de 4 módulos fiscais representam 98% de todo território no entorno do PESB (CSR, 2023).

A área de pesquisa possui uma rede diversificada de rodovias federais e estaduais, responsáveis pela conexão territorial. A BR-482 atravessa o parque, sendo o principal acesso à portaria principal, no município de Araponga (oeste do parque) e a portaria secundária, em Fervedouro (leste do parque). As estradas, além dos benefícios, trazem também impactos negativos às formações naturais, devido ao efeito de borda. Tornou-se evidente na paisagem o surgimento de plantações de eucalipto, utilizados na região, em sua maioria, para a fabricação de carvão.

3.2. Base de dados

Foram utilizadas bases de dados *multisource* disponíveis em sítios públicos de acesso gratuito, empregadas para a produção das variáveis necessárias ao diagnóstico espacial e produção dos modelos (Quadro 1). A declividade e a hidrografia foram geradas a partir de uma série de processos e técnicas de geoprocessamento, por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente do satélite Alos Palsar.

Quadro 1: Base de dados

Base de dados	Fonte	Aplicação
Limites estaduais e municipais	IBGE	Contorno do estado e dos municípios envolvidos na área de pesquisa.
PESB	IEF	Limite da unidade de conservação que será uma variável na modelagem dinâmica.

Uso da terra 1985, 2005 e 2022	Projeto Mapbiomas, coleção 8.0	Comporão os <i>inputs</i> referentes aos usos da terra, em cada fase metodológica. Algumas classes serão agrupadas por similaridade. Do uso da terra que se fez também a separação de manchas florestais e manchas urbanas que tiveram as distâncias euclidianas calculadas. Resolução do raster 30 metros.
Modelo digital de Elevação	Alos Palsar	O MDE foi utilizado do Alos Palsar, com resolução de 30 metros, para a obtenção da declividade e comprimento de rampa das vertentes, elementos estes utilizados no cálculo do Fator LS.
Solos	UFV	Tipos de solo e também foi utilizado na elaboração da variável Erodibilidade do solo.
Taxa de carbono	Embrapa Solos	Variável com as taxas de carbono em níveis do solo. Foi calculado o acumulado de carbono presente na camada de 0 a 20 cm de profundidade do solo.
Hidrografia	Alos Palsar	Limites da rede hidrográfica, que serviu como insumo na confecção da variável de Distância Euclidiana em relação aos corpos hídricos, calculada a partir do MDE.
Bacia hidrográfica	IGAM	Limite das bacias hidrográficas que compõem a área de pesquisa.
Declividade	Alos Palsar	Classes de declividade expressa em porcentagem. Calculada a partir do MDE.
Rodovias	IDE-SISEMA	Utilizada na confecção da variável de distância euclidiana em relação às rodovias.
Déficit ambiental	CSR/UFMG	Shapefile resultante do trabalho da equipe de pesquisadores do Centro de Sensoriamento Remoto (IGC/UFMG), no qual se fez o quantitativo do déficit ambiental (RL e APP) nas propriedades rurais, segundo normas do Código Florestal.

Fonte: Elaboração própria.

As bases de dados foram reprojetadas para o Datum SIRGAS 2000 e projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) 23S (EPSG: 31983). Cada base foi utilizada para a produção de uma ou mais variáveis, que foram utilizadas nos processos construtivos da pesquisa.

Os *rasters* do uso da terra dos anos 1985, 2005 e 2022, provenientes do Mapbiomas, foram reclassificados, utilizando-se como critério as classes com maior expressão espacial. Adotaram-se as classes propostas e as descrições elaboradas pelo Mapbiomas para a coleção 8.0 (Quadro 2).

Quadro 2: Reclassificação dos usos da terra para 1985, 2005 e 2022

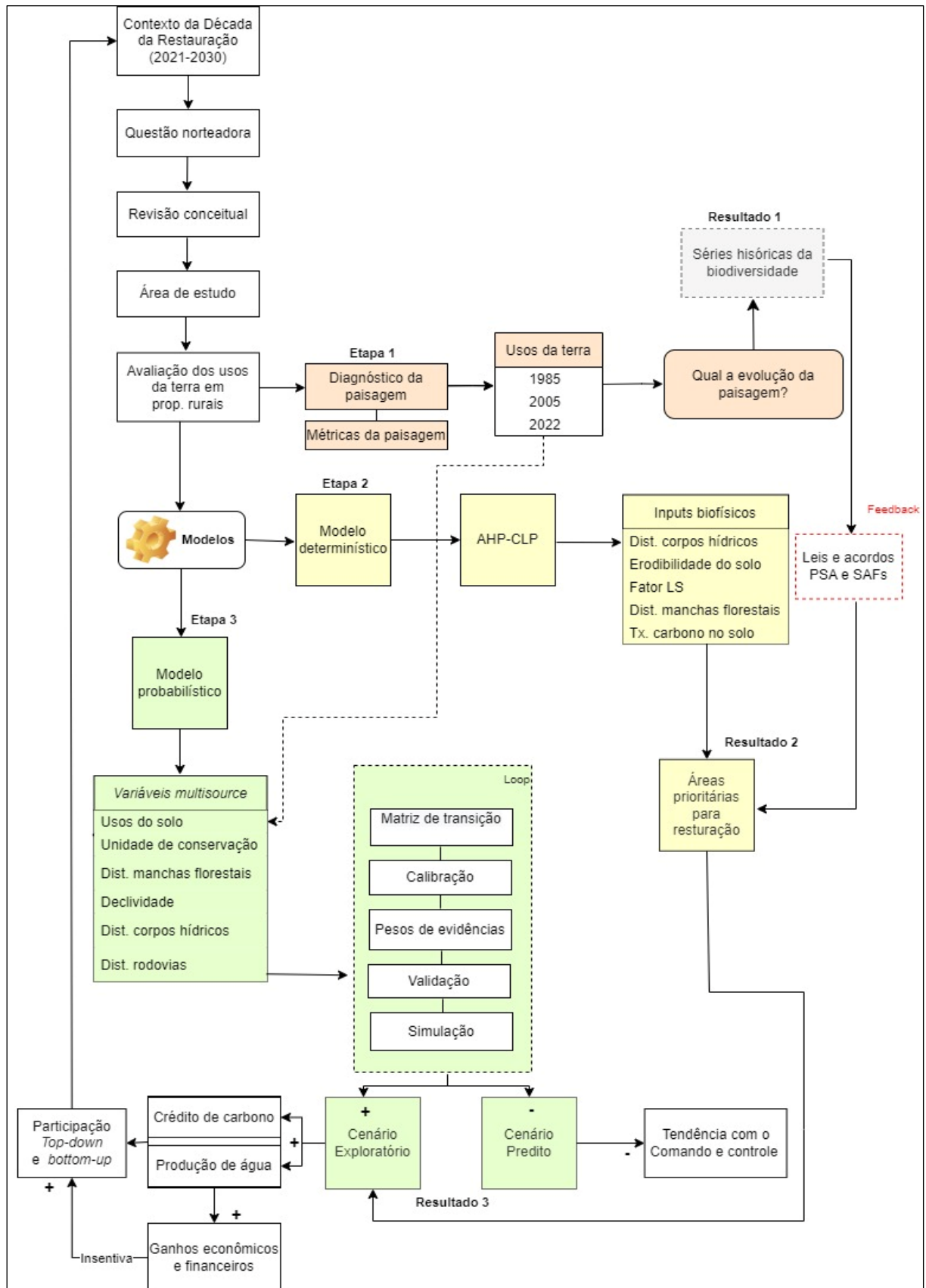
Classe	Conteúdo
Floresta	Formações florestais de Mata Atlântica e matas ciliares em diferentes estágios.
Pastagem	Formações típicas de pastagem que surgiu naturalmente, em sucessão a áreas desflorestadas e pasto plantado para a pecuária.
Agricultura	Cultivos permanentes e perenes.
Café	Apesar do ser um cultivo permanente, foi separado devido sua expressividade espacial durante os anos.
Silvicultura	Apesar do ser um cultivo permanente, foi separado devido sua expressividade espacial durante os anos.
Mosaico de usos	Áreas de uso agropecuário, sem distinção entre pastagem e agricultura.
Urbano	Áreas densidade de edificações e vias, incluindo áreas livres de construções e infraestrutura.
Mineração	Áreas referentes a extração mineral de porte industrial ou artesanal (garimpos), havendo clara exposição do solo por ação por ação antrópica.
Corpos d'água	Incluem rios, lagos, represas, reservatórios naturais e artificiais.

Fonte: adaptado de Mapbiomas, coleção 8.0

3.3. Métodos

O processo metodológico, exposto de forma sequencial na Figura 3, foi conduzido por três etapas: i) diagnóstico da paisagem, tendo-se como resultado a análise das séries históricas de biodiversidade, por meio de métricas da paisagem e a quantificação do estoque de carbono nas florestas em pé; ii) concepção e proposição de um modelo determinístico, utilizando-se do método AHP-CLP, sendo o resultado a identificação das áreas prioritárias à restauração ativa, sob os incentivos de créditos de carbono e produção de água, impulsionados pelas políticas de PSA e iii) concepção e proposição de modelos probabilísticos, tendo-se como resposta a produção de dois cenários: preditivo e exploratório, estimados para o ano de 2050 (Figura 3).

Figura 3: Organograma de etapas, métodos e resultados da pesquisa



Fonte: Elaboração própria.

O processo metodológico da pesquisa de tese, como já informado, possui três etapas interconectadas (Figura 3): diagnóstico (Etapa 1), modelagem determinística (Etapa 2) e modelagem probabilística (Etapa 3). Essas fases foram importantes para a produção de cenários de restauração ambiental, ocorrendo de forma sequencial e integrada. Cada etapa gerou insumos essenciais para a etapa seguinte, garantindo uma continuidade lógica e coerente no desenvolvimento do estudo.

Na fase de diagnóstico, por meio das métricas da paisagem, foram identificadas as condições iniciais e as áreas prioritárias para a restauração. A modelagem determinística, então, utilizou esses dados para criar cenários iniciais de restauração, baseados em parâmetros fixos e definidos. Por fim, a modelagem probabilística incorporou a variabilidade e incerteza dos dados, refinando os cenários e proporcionando uma visão mais realista e abrangente das possíveis trajetórias de restauração.

Essa abordagem metodológica permitiu uma análise aprofundada e dinâmica, combinando diferentes técnicas e perspectivas para alcançar resultados robustos e aplicáveis à prática de restauração ambiental. Além disso, a interconexão entre as etapas garantiu que o conhecimento gerado em cada fase fosse aproveitado de maneira otimizada, contribuindo para a eficiência e a eficácia do estudo.

3.3.1. Etapa 1: Métricas da paisagem aplicadas ao diagnóstico ambiental da área de pesquisa

As métricas utilizadas para a formulação do diagnóstico de mudanças espaço-temporais do entorno do PESB, demonstraram eficiência em trabalhos investigativos dos usos da terra (Lausch; Herzog, 2002; Martensen; Pimentel; Metzger, 2008; Sowińska-Świerkosz; Soszyński, 2014; Vandermeer; Perfecto, 2007; Wang *et al.*, 2022; Xia *et al.*, 2021).

A leitura da organização espacial, iniciou-se sobre métricas que permitiram à compreensão da organização da paisagem, munidas de características pertinentes a área, forma, conexão e diversidade. Além disso, as métricas foram avaliadas em nível de classes e paisagem. Prioritariamente, as métricas devem ser analisadas em conjunto, para adequada consistência espacial (Botequilha-Leitão; Ahern, 2002). Cada métrica traz pistas sobre os comportamentos

dos usos da terra no tempo. A análise conjunta que possibilita uma coerência concisa da paisagem (Botequilha-Leitão; Ahern, 2002; Carvalho-Ribeiro; Lovett, 2009).

As métricas de área informam o quantitativo de um uso da terra na paisagem. São importantes, sobretudo para aferições sobre disponibilidade de recursos. As métricas de forma explicitam a relação de um fragmento com o ambiente externo, como a matriz ou mesmo a outro tipo de fragmento. Pela forma, consegue-se interpretar a interferência de efeitos de borda. As métricas de conexão mensuram a permeabilidade existente entre fragmentos de mesma espécie em meio a matriz. Por fim, métricas de diversidade relatam a magnitude da composição da estrutura da paisagem. Expõem o grau de homogeneidade e heterogeneidade em um determinado recorte espacial. As métricas utilizadas na pesquisa (

Quadro 3) possibilitaram uma análise sinérgica das relações espaciais no tempo.

O software utilizado para a obtenção das métricas da paisagem acima identificadas foi o Fragstats 4.2 (Mcgarigal, 2015). As métricas foram calculadas para cada um dos anos (1985, 2005, 2022). Em seguida, os valores obtidos foram confrontados com o intuito de se identificar mudanças nos usos da terra. Os insumos quantitativos das métricas obtidas foram avaliados em minuciosidades. Uma vez que, a região já havia passado por alterações históricas anteriores aos anos eleitos para a pesquisa.

Quadro 3: métricas da paisagem aplicadas na área de pesquisa

Métrica	Abreviação	Descrição
Área Total	CA	Informa quanto determinada classe ocupa em uma região. Valores próximos de 0 demonstram que a classe ocupa pequena área em relação à área total.
Área média	AREA_MN	Traz à área média em hectares de cada classe dentro da área pesquisada.
Desvio padrão em relação a área média	AREA_SD	Desvio padrão em relação a área média. Pode-se assim verificar se os tamanhos das classes se mantiveram no tempo ou se produziram <i>outliers</i> significativos.
Porcentagem da paisagem	PLAND	Corresponde a porcentagem da classe na paisagem.
Número de manchas	PN	Expõe o número de fragmentos ou manchas em uma classe na área pesquisada.
Forma média	SHAPE_MN	Possibilita estimar a exposição de uma classe ao efeito de borda. Valores próximos de 0 significa que as formas são mais similares ao círculo ou quadrado (isodiamétricos). Já o contrário, valores próximos a 1 demonstram formas complexas e mais suscetíveis a interferência externa.

Média das distâncias dos vizinhos	ENN_MN	Distância média entre as manchas. Deve ser analisada em conjunto com o ENN_SD para a compreensão da variação real.
Desvio padrão da média dos vizinhos	ENN_SD	Indica a variação dos valores em relação à média das distâncias entre os vizinhos. Valores muito distintos da média, demonstram fragmentos de tamanhos variados.
Índice de conectividade estrutural	COHESION	Possibilita quantificar a conectividade física do habitat. O valor aumenta na medida que os fragmentos estejam mais agrupados e reduz em paisagens com alta dispersão.
Índice de diversidade de Shannon	SHDI	O índice Shannon explicita valores referente a diversidade da paisagem. Aumenta proporcionalmente ao PR, sendo que paisagens com apenas uma classe, possuirão valor 0. Já paisagens com variados usos da terra, o índice aumentará até atingir o valor máximo de 1.
Riqueza de classes	PR	Utilizado para aferir a diversidade de classes e espécies. Possibilita aferir o número de tipo de fragmentos presentes na paisagem, sendo quanto a premissa baseada em maior número de classes influenciará em maior número de espécies.

Fonte: Adaptado de Macgarigal (2015)

3.3.2. Etapa 2: Método AHP-CLP para priorização de áreas restauradas

A definição do modelo determinístico por meio do método AHP-CLP perpassa por etapas metodológicas necessárias e complementares. A formulação lógica da AMC é composta por três etapas, sendo elas: i) Estruturação em níveis hierárquicos, ii) Definição de prioridades e iii) Consistência lógica (Chandio *et al.*, 2013; Costa, 2002; Saaty, 1990).

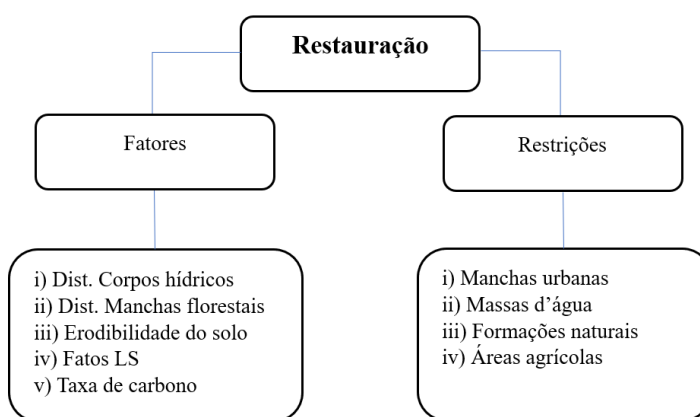
Estruturação dos níveis hierárquicos

Nesta etapa, define-se o objetivo central do modelo. No caso específico da pesquisa, a investigação das melhores áreas para restauração ativa das formações naturais no entorno do PESB. A proposição de restauração deverá priorizar um cenário futuro de aumento do estoque de carbono pela biomassa florestal e a produção de água. A melhoria desses dois serviços ecossistêmicos, produzirão efeitos positivos em demais segmentos que compõem a paisagem, como aumento da biodiversidade de espécies, qualidade do solo e melhoria na agricultura. Os critérios em uma AMC podem ser classificados como critérios fatores e critérios restrições (Eastman, 2001). Os critérios fatores devem responder por considerável parcela do fenômeno avaliado (Valente; Petean; Vettorazzi, 2017). Relacionam entre si, em uma coerência hierárquica, que resulta em um modelo com resultados que obedecem a uma lógica matemática. Os critérios restritivos impedem a propagação do fenômeno analisado no espaço. São barreiras

naturais ou artificiais que, no modelo espacialmente explícito são representados por mapas booleanos com o valor zero (0) (Eastman, 2001; Vetorrazzi, 2006).

Neste contexto, para a produção de um modelo que auxilie na identificação de melhores áreas para a restauração no entorno do PESB, visando-se o aumento de estoque de carbono e a produção de água, foram eleitos os seguintes critérios: i) distância dos corpos hídricos, ii) distância das nascentes, iii) distância das manchas florestais iv) erosibilidade do solo, v) fator LS e vi) taxa de carbono no solo. Já como critérios restritivos foram selecionados usos da terra impossibilitados ao plantio das espécies nativas, sendo eles: i) manchas urbanas; ii) massas d'água; iii) formações naturais e iv) áreas agrícolas (Figura 4).

Figura 4: Estruturação do nível hierárquico AHP



Fonte: Elaboração própria.

A mancha urbana engloba as estruturas residenciais, comércio e malha viária. A massa d'água representa os rios, ribeirões, lagos e represas. As formações naturais são compostas por manchas florestais. Já em áreas agrícolas, considerou-se cultivos perenes e não perenes, exceto as áreas de silvicultura. Apesar da existência de uma mineração de bauxita, esta não foi inserida como uma restrição. Tal posicionamento foi pautado no preceito de recuperação ambiental previsto em lei.

Definição de prioridades

Nesta etapa, utilizam-se das habilidades de pesquisadores para percepção dos relacionamentos entre os critérios, atribuindo-os pesos relativos, de acordo com o objetivo central, em uma comparação pareada exposta em uma matriz de comparação. Os pesos relativos podem ser compostos por opinião direta de especialistas; referências técnicas proveniente de trabalhos similares e/ou levantamentos em campo (Eastman, 2001; Ismail; Geneletti, 2018; Malczewski, 2004). Na pesquisa, adaptou-se a sequência hierárquica e pesos relativos para os critérios, baseado em trabalhos científicos anteriores, elaborados por especialista sobre temas similares (Cosimo; Martins; Gleriani, 2021; Hussain *et al.*, 2015; Ismail; Geneletti, 2018; Sartori *et al.*, 2012; Vetorrazzi, 2006; Vettorazzi; Valente, 2016).

Os critérios foram analisados em pares para se estabelecer uma importância relativa entre eles, quanto ao fenômeno em questão. Fez-se uso da Escala Fundamental proposta por Saaty (1977) considera nove valores comparativos (Quadro 4).

Quadro 4: Escala fundamental de comparação

Escala	Definição	Explicação do valor
1	Igualmente	Ambos os critérios contribuem igualmente
3	Moderadamente	Um critério possui importância moderada
5	Fortemente	Um dos critérios é fortemente mais importante
7	Muito fortemente	Um dos critérios se posiciona fortemente sobre o outro
9	Extremamente	Um dos critérios possui a maior importância sobre o outro
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Valores equidistante entre duas importâncias

Fonte: Adaptado de Saaty (1977)

O valor 9 representa a extrema importância de um critério em relação ao outro. O valor 1 possui comportamento inverso, menor importância. Os números pares: 2, 4, 6 e 8 possuem escala intermediária entre duas escalas ímpares. Os valores da Escala Fundamental estabelecida por Saaty (1977) são inseridos na matriz de comparação pareada composta pelos critérios fatores distribuídos em linhas e colunas. O fator que está na linha é comparado com o fator que se encontra na coluna. Quando a linha e coluna possuírem o mesmo fator, a resposta numérica

será 1 que comporá a diagonal central da matriz. A matriz por ser simétrica, insere-se os valores em apenas em um dos triângulos formados em relação a diagonal central, adquirindo o triângulo oposto os valores inversos do seu simétrico (Quadro 5).

Quadro 5: Matriz de comparação pareada

		A_1	A_2	$\dots$	A_n
$A =$	A_1	w_1/w_1	w_1/w_2	$\dots$	w_1/w_n
	A_2	w_2/w_1	w_2/w_2	$\dots$	w_2/w_n
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
	A_n	w_n/w_1	w_n/w_2		w_n/w_n

Fonte: Saaty (1977)

Em sequência, faz-se a normalização ou ponderação dos valores da matriz, de maneira que os novos valores estejam incluídos no conjunto de números racionais entre zero (0) e um (1). Para isso, efetua-se a divisão de cada célula pelo total da coluna que se encontra inserida. A partir da matriz normalizada, obtém-se os pesos utilizados na AMC, que indicarão a hierarquia de cada critério quanto a produção do fenômeno analisado (Saaty, 1990). Os pesos normalizados são resultantes da média de cada linha da matriz normalizada.

Consistência lógica

A terceira etapa do método AHP-CLP testa se a lógica estabelecida entre os critérios e seus pesos estão coerentes (Chandio *et al.*, 2013; Costa, 2002; Saaty, 1990). O cálculo da Razão de Consistência (RC) é elaborado para obter a probabilidade dos pesos de cada critério estar coerente em uma distribuição randômica dada pela escolhas dos especialistas (Saaty, 1977, 1990). Para estar em uma escala de conformidade, o RC necessita ser menor que 10%. Caso dê acima disso, os pesos estão incoerentes e devem ser reavaliados (Saaty, 1977). O cálculo do RC é dado pela equação 01 abaixo:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (1)$$

O Índice de Consistência (IC) é obtido pela subtração do autovalor (λ_{max}) pelo número n de critérios, dividido pelo número de critérios menos um ($n-1$).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Deve-se ter em consideração que, nas fases anteriores, geram-se a matriz de comparação (A) e a matriz normalizada (W). Também o peso ponderado referente à matriz normalizada. Estes insumos fazem parte do λ_{max} . Para seu cálculo, soma-se as multiplicações cada linha da matriz de comparação (A) pelo peso normalizado da linha na matriz (W) e se divide pelo mesmo peso normalizado. Já o Índice Randômico (IR) possuem um valor definido em tabela de acordo com o número n de critérios (Tabela 1).

Tabela 1: Índices Randômicos de acordo com os números de critérios

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0,58	0,9	1,12	1,14	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: Saaty (1990)

Obtendo-se um RC abaixo de 10%, o próximo passo será gerar a função algébrica CLP. O resultado resultará da soma da multiplicação de cada peso normalizado pelo respectivo critério (Voogd, 1982).

$$S = \sum (w_i \cdot x_i) * \prod c_j \quad (3)$$

Sendo:

Wi = peso do critério;

Xi = valor do pixel que compõe o critério;

Π_{cj} = multiplicação das restrições;

Em ambiente SIG, obtém-se o mapa da combinação pertinente aos critérios fatores e seus pesos. Nesta fase são inseridos também os critérios restrições que impedirão a expansão do fenômeno para determinados usos da terra, no caso da pesquisa, haverá restrição de áreas restauradas para manchas urbanas, massas d'água, formações florestais e áreas agrícolas.

3.3.2.1. Preparação de variáveis para o modelo determinístico

Como informado anteriormente, as variáveis ou critérios utilizados para o modelo determinístico AHP-CLP, demonstraram adequada responsividade na definição das áreas à restauração florestal ativa. Ainda que outras variáveis, para além dessas aqui trazidas, também possam ter correlação com serviços ecossistêmicos essenciais. As variáveis em uso, foram percebidas em pesquisas científicas transversais, com maior grau de participação quando o tema envolvia produção de água, manutenção dos solos e aumento da biodiversidade (Cosimo; Martins; Gleriani, 2021; Lopes i 2021; Mafra *et al*, 2020; Nossak *et al*, 2011; Sartori *et al.*, 2012; Valente *et al*, 2017; Vetorrazzi, 2006; Vettorazzi; Valente, 2016).

Torna-se notório que o processo de restauração possui diversas barreiras, dentre elas a econômica, sob a alegação de necessidade de novas áreas para produção de alimentos, apesar de estudos demonstrarem a eficiência econômica e ambiental em práticas como a ABC e SACs (EMBRAPA, 2022). Em sequência, tem-se o descritivo das variáveis e os processos metodológicos aplicados para sua obtenção:

Distância dos corpos hídricos - variável de alta relevância, destacando-se em pesquisas ambientais devido aos seus benefícios para a dinâmica da paisagem. A presença de matas ripárias nas margens dos canais fluviais é importante para a manutenção da qualidade e quantidade dos recursos hídricos, essenciais tanto para o planeta quanto para as necessidades humanas, conforme aponta Duarte (2018). A rede hidrográfica detalhada da área de estudo foi obtida utilizando MDE. Antes de processar os canais fluviais, correções de depressões espúrias foram realizadas usando o algoritmo *r.fill.dir*, do pacote Grass, integrado ao QGIS 3.30.2. Posteriormente, com o MDE corrigido, aplicou-se o algoritmo *r.stream.extract*, também do Grass. Em seguida, foram calculadas distâncias euclidianas contínuas, com valores

decrecentes a partir dos canais fluviais, até o limite de um buffer de 10 quilômetros estabelecido ao redor do PESB, utilizando o algoritmo *r.grow.distance*, igualmente do Grass.

Distância às manchas florestais – as formações naturais possuem importância quanto a biodiversidade, bem como a manutenção da qualidade do solo e regulação da temperatura. As UCs como o PESB possuem papel fundamental para o equilíbrio ecossistêmico, sobretudo em regiões com elevada alteração da paisagem como a área de estudo (Cosimo; Martins; Gleriani, 2021). Todavia, as UCs podem se tornar em ilhas isoladas, quando as manchas florestais em seu entorno são suprimidas em demasia. Por vez, torna-se necessário a recuperação de áreas que contribuam com a formação de corredores ecológicos e *stepstones* (Pinto, L. P.; Bede, 2006; Ribeiro *et al.*, 2009). Para a concepção dessa variável, primeiro obteve-se o arquivo com os usos da terra de 2022, com destaque às coberturas de Mata Atlântica em Minas Gerais disponibilizado Projeto Mapbiomas, coleção 8.0. As manchas florestais foram separadas em arquivo único. Neste arquivo, elaboraram-se os procedimentos de rasterização e produção das distâncias euclidianas (*r.stream.extract*) com valores decrescentes a partir das manchas, sendo o limite extremo o buffer da área de pesquisa.

Erodibilidade do solo – são comportamentos específicos de cada solo quanto a facilidade de desprendimento de partículas (sedimentos) condicionado por atributos estruturais, mineralógicos, químicos e morfológicos (Bertoni; Lombardi Neto, 2012). Os sedimentos dispersos tendem a ser carregados para os níveis de base local que, em grande maioria são representados pelos canais fluviais. Apesar de erodibilidade ser um processo natural, os usos da terra sem um devido planejamento, possibilita o aumento do processo. O excesso de sedimentos na rede hidrográfica pode comprometer a qualidade da água, promover assoreamento dos leitos fluviais e, conseqüente desequilíbrio ecossistêmico (Vettorazzi; Valente, 2016). A erodibilidade ou Fator K é uma das componentes da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) (Choudhury; Nengzouzam; Islam, 2022; Hu *et al.*, 2021; Bertoni; Lombardi Neto, 2012). Cada solo possui um índice próprio de erodibilidade que o definirá com maior ou menor suscetibilidade à perda de partículas em momentos de chuva. A base de dados com classes de solo para a formulação de erodibilidade foram adquiridas no repositório da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Fator LS – fator que associa comprimento de rampa “L” (*length*) com declividade “S” (*slope*). Ambos os elementos influentes quanto à erosão hídrica. O comprimento das vertentes

influenciará no tempo de permanência da água sobre a superfície, já a inclinação influencia na energia cinética do escoamento, que poderá ocasionar perda do solo e formação de erosões aceleradas (Agência Portuguesa do Ambiente, 2020). O Fator LS é relevante em pesquisas ambientais por permitir aferir, em um mesmo solo, comportamentos distintos em períodos chuvosos. Quanto maior o Fator LS, maior será a perda de solo, logo é uma variável de comportamento crescente. Para calcular a variável, utilizou-se o MDE para gerar os comprimentos de rampa e as inclinações em percentuais, que são essenciais na elaboração do fator por meio do algoritmo *LS-Factor, field based*.

Taxa de carbono no solo – variável relevante quando mitigações aos efeitos do aquecimento climático. Neste contexto, o solo possui alta contribuição para o aprisionamento do carbono orgânico, sobretudo nas primeiras camadas (EMBRAPA, 2022). O solo em regiões tropicais, chega a estocar até 4 vezes a quantidade de carbono presente na vegetação (Machado, 2005). A vegetação, além de fornecedora do carbono que migra nas camadas do solo, promove também proteção contra os efeitos erosivos da chuva que desagregam e carregam o composto para fora do sistema pedológico (EMBRAPA, 2022; HU *et al.*, 2021). Diante do exposto, o estoque de carbono passa a ser uma variável importante para tratativas quanto às mudanças climáticas, proteção dos corpos hídricos e, consequente restauração florestal. A variável possui comportamento crescente, ou seja, quanto maior o valor da taxa de carbono, mais favorável a área para a restauração. A base utilizada foi elaborada pela Embrapa-solos, disponibilizada em site oficial do órgão.

3.3.3. Etapa 3: Procedimentos para a modelagem dinâmica

Na modelagem de sistemas ambientais, o desenvolvimento começa com o esboço de um modelo conceitual. Este modelo é importante pois serve como uma estrutura teórica que orienta todo o processo de modelagem. O modelo conceitual permite identificar e selecionar as possíveis variáveis ou *drivers* que são mais relevantes para o fenômeno em estudo, bem como estabelecer conexões entre as fases.

Em sequência, avaliou-se a configuração espacial da área de estudo, por meio de bases históricas de uso e cobertura da terra. Estes *rasters* referentes aos anos de 1985, 2005 e 2022 também foram insumos para as fases construtivas do modelo. Tais arquivos foram adquiridos

através do sítio eletrônico Mapbiomas (Projeto Mapbiomas, 2023), pertencentes à coleção 8.0, que apresenta imagens de satélite com uma resolução de 30 pixels.

As diferentes classes identificadas nas imagens foram reclassificadas para promover a análise do fenômeno de restauração florestal, sendo agrupadas nas seguintes categorias: (1) formações florestais, (2) pastagem e mosaico de uso, (3) agricultura perene, intermitente, café e silvicultura, (4) Urbano e mineração. Com exceção das formações florestais, as demais classes estão diretamente ligadas ao processo de desmatamento imperante no passado. No estudo, buscou-se elucidar um movimento inverso ao desmatamento, baseado em possibilidades de expansão florestal em propriedades rurais. Presume-se que a presença de áreas restauradas ativamente, no contexto da paisagem, proporcionará maior celeridade ao aumento e recomposição de manchas florestais de maneira passiva no futuro. Destaca-se que a expansão florestal se dará, prioritariamente sobre áreas de pasto e mosaicos de uso, restringindo-se aos demais usos da terra que poderiam gerar conflitos de interesse.

As variáveis adotadas foram aquelas com aderência ao processo de restauração florestal, sendo algumas com peso positivo ao fenômeno e outras com peso negativo. As variáveis selecionadas para tal fim foram: i) distância da unidade de conservação – variável contínua em metros, iniciada no limites do PESB; ii) distância de áreas florestais – variável contínua em metros; iii) declividade do terreno – variável contínua em porcentagem; iv) proximidade a corpos hídricos – variável contínua em metros; e v) distância das rodovias – variável contínua em metros.

Além das variáveis acima utilizadas nos modelos preditivo e exploratório, neste último também se incorporou como *input* o *raster* das áreas prioritárias para restauração, gerado na fase anterior da pesquisa (modelagem determinística). Essa variável desempenha o papel de *driver* positivo para a recomposição florestal até o ano de 2050. No ano final da projeção foi realizada uma comparação entre os usos da terra modelados pelo método preditivo e pelo exploratório. Isso permitiu avaliar o impacto das áreas de restauração provenientes da AHP-CLP e sua eficácia para o contexto de uma restauração exontânea, a partir de sua introdução na paisagem.

Para a modelagem das mudanças nos usos e coberturas da terra ao longo do tempo, utilizou-se o software Dinâmica EGO versão 7.4.0. Este software é especialmente capacitado para realizar análises detalhadas e dinâmicas das transformações ambientais. O Dinâmica EGO

permite aos usuários simularem e visualizar os efeitos das variáveis inseridas sobre as dinâmicas de uso e cobertura da terra, facilitando assim a compreensão de complexas interações ambientais e o planejamento de ações baseadas em evidências científicas.

3.3.3.1. Fases da modelagem dinâmica

Anterior as fases da modelagem, faz-se necessário o cálculo da matriz de transição. A matriz de transição quantifica as probabilidades de mudança entre diferentes tipos de uso do solo ao longo de um período específico. A matriz é construída com base em dados históricos e padrões observados de alterações no uso da terra. No caso do estudo, foram utilizados os usos da terra reclassificados dos anos de 1985 e 2005. Apesar de não ser um modelo, propriamente dito, a matriz de transição é uma etapa importante que estará ligada às fases da modelagem. Para construir a matriz, cada elemento P_{ij} representa a probabilidade de transição do estado i para o estado j durante um período específico.

A fórmula geral para uma matriz de transição P em um modelo espacialmente explícito é:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde:

n é o número de estados possíveis.

p_{ij} é a probabilidade de transição do estado i para o estado j .

Cada possibilidade de mudança, seja uma modificação ou a manutenção do estado inicial, é mapeada de forma espacialmente explícita através de pixels. Estes pixels são manipulados seguindo o paradigma de autômatos celulares, que permite simular o processo

espacial e temporal de mudança de paisagem de maneira detalhada e contextualizada com o ambiente em questão (Soares-Filho *et al*, 2007).

A modelagem espacialmente explícita desenvolvida no Dinâmica EGO, inclui etapas de calibração, validação e projeção. Na calibração, os parâmetros do modelo são ajustados usando dados de referência para refletir as dinâmicas de uso do solo com precisão. Durante a validação, verifica-se a capacidade do modelo de generalizar, usando dados não empregados na calibração para garantir a precisão das simulações. A projeção emprega o modelo calibrado e validado para prever mudanças no uso da terra sob diferentes cenários que podem auxiliar na formulação de políticas de gestão (Rodrigues *et al.*, 2007).

Calibração

A calibração é a fase de ajuste dos *inputs* do modelo, de maneira a se obter um padrão de alterações mensuráveis no espaço e no tempo. Deve ser tratada com atenção, pois refletirá diretamente nas demais fases e, mesmo da precisão do modelo. Na calibração, a primeira ação é o cálculo de Pesos de evidências (*Weights of Evidence*). O método de Pesos de Evidência baseia-se no princípio Bayesiano para quantificar a relevância de cada variável no tocante ao fenômeno de mudança analisado. O Teorema de Bayes fornece uma forma de atualizar as probabilidades de um evento com base em novas evidências ou informações. Ele é formulado da seguinte maneira:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (6)$$

Onde:

$P(A|B)$ representa a probabilidade posterior de A dado B.

$P(B|A)$ representa a probabilidade de B dado A.

$P(A)$ representa a probabilidade anterior de A.

$P(B)$ representa a probabilidade de B.

Esse processo envolve estimar a influência de cada, variável no processo construtivo da paisagem, mas sem desconsiderar as inter-relações espaciais entre elas, de maneira a mantenham independência espacial entre as variáveis preditoras (Soares-Filho *et al*, 2007). Este cuidado é essencial para assegurar a validade estatística dos pesos atribuídos às variáveis, evitando vieses decorrentes de correlações espaciais não detectadas ou mesmo aquelas espúrias.

A independência das variáveis preditoras são checadas por meio de testes de correlações. Os testes de correlação entre variáveis espaciais são técnicas usadas para avaliar o grau de relação entre duas ou mais variáveis geograficamente referenciadas, neste ensejo, variáveis auto correlacionadas devem ser evitadas. No estudo, aplicou-se o teste de Cramer, método estatístico utilizado para verificar a associação entre variáveis categóricas. O teste se baseia na estatística do qui-quadrado (χ^2) de Pearson para medir as correlações, mas ao contrário do qui-quadrado que apenas indica a existência de uma associação, o coeficiente de Cramer também fornece uma medida da intensidade dessa associação (Bonham-Carter, 1994). Ao medir a força da associação entre as variáveis, produz um valor que varia entre 0 e 1, onde 0 indica nenhuma associação e 1 indica uma associação perfeita. A fórmula do coeficiente de Cramer (V), é estabelecida por:

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{n \cdot \min(k-1, r-1)}} \quad (6)$$

Onde:

χ^2 é a estatística qui-quadrado obtida do teste de associação entre as variáveis.

n é o número total de observações.

K é o número de colunas na tabela de contingência.

r é o número de linhas na tabela de contingência.

$(\min(k-1, r-1))$ é o menor valor entre ($k-1$) e ($r-1$).

Essa fórmula ajusta o valor de qui-quadrado para o tamanho da tabela, oferecendo uma medida normalizada que varia de 0 (nenhuma associação) a 1 (associação perfeita), facilitando a interpretação da força da associação entre as variáveis categóricas.

Em aplicações práticas, especialmente na modelagem estatística, recomenda-se que o valor do teste de Cramer seja inferior a 0.5 para que as variáveis sejam consideradas suficientemente independentes (Bonham-Carter, 1994). Isso é imperante para evitar multicolinearidade, que pode distorcer os resultados de um modelo e prejudicar a interpretação dos efeitos.

Em mesmo sentido, com o intuito de mensurar a significância das variáveis independentes eleitas para o efeito na variável dependente (restauração florestal), aplicou-se o coeficiente de determinação (R^2). O coeficiente indica o quanto da modificação em uma variável dependente é explicada pela variável independente em um modelo de regressão. O R^2 também varia de 0 a 1, onde um valor de 0 indica que o modelo não explica nada da variabilidade dos dados em relação à média, e um valor de 1 indica que o modelo explica toda a variabilidade. Portanto, quanto maior o R^2 , mais eficaz é o modelo em capturar as relações observadas entre as entradas e saídas (Ozili, 2023). Torna-se essencial para avaliar a força e a utilidade de um modelo preditivo. A fórmula geral do coeficiente de determinação, R^2 é dada por:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{res}}}{SS_{\text{tot}}} \quad (7)$$

Sendo:

- SS_{res} é a soma dos quadrados dos resíduos, que representa a variância dos erros do modelo.
- SS_{tot} é a soma total dos quadrados, que mede a variância total dos dados em torno da média.

Pesos das variáveis abaixo de com R^2 abaixo de 75% foram ajustados para alcançar valores pertinentes, que demonstrassem a tendência na paisagem, garantindo a confiabilidade dos dados na calibração do modelo.

Validação

A validação é fase da modelagem espacial, onde se realiza a primeira simulação de resultados. Diferente dos cenários da projeção, a simulação para a validação produz dados baseados em informações históricas. Essas simulações são comparadas com os valores reais observados para avaliar a precisão e a eficácia do modelo.

No contexto do software Dinâmica EGO, a validação envolve o uso do mapa de uso da terra final do par utilizado na calibração, neste caso o mapa classificado do ano de 2005. A partir desse mapa, agrupam-se os pesos de evidências de cada variável e a matriz de transição, gerando-se mapas simulados para anos subsequentes. No caso específico da pesquisa, esses mapas são simulados para um período de 17 anos, a partir de 2005 até o ano de 2022.

A utilização do Dinâmica EGO, com seu enfoque em pesos de evidências e matrizes de transição, é eficaz para modelagem espacial e validação, permitindo uma avaliação consistente da dinâmica do uso da terra ao longo do tempo. Além disso, técnicas como a validação cruzada e a análise de sensibilidade são recomendadas para fortalecer ainda mais a confiabilidade dos modelos desenvolvidos. Essas práticas asseguram que os modelos não apenas reproduzam padrões passados com precisão, mas também sejam robustos e adaptáveis para projeções futuras.

Em seguida, fez-se a utilização da ferramenta *Patcher* projeta a criação de novas manchas florestais, de acordo com o padrão espacial medido. O functor funciona sobre os critérios dos autômatos celulares, criando-se manchas em células propícias à mudança da classe do uso da terra para a composição de floresta. O modelo foi processado com escala temporal de um ano, tendo como resultado os *rasters* da paisagem simulada e os *rasters* de probabilidade de cada variável. Para a validação foram utilizados os *inputs*: raster simulado de 2022, proveniente da fase anterior e *rasters* observados de 2005 e 2022.

No cálculo de diferença entre o simulado e observado, estabeleceu-se uma janela de decaimento de 11x11 pixels. A janela de decaimento de 11x11 pixels na modelagem na Dinâmica EGO refere-se a um filtro ou máscara utilizada para suavizar os valores de um conjunto de dados em uma imagem ou mapa. Essa janela tem uma área de 11 pixels de largura por 11 pixels de altura, o que permite a consideração dos valores de 121 pixels ao redor de cada

ponto central. O decaimento implica que os pixels mais próximos do centro têm maior influência na média ponderada ou na suavização, enquanto os pixels mais distantes têm uma influência reduzida. Esse método é utilizado para minimizar o ruído e destacar padrões ou tendências subjacentes nos dados, proporcionando uma representação visual mais clara e interpretável.

Projeção para cenários futuros

Esta fase da metodologia é dedicada à simulação de cenários preditivos e exploratórios para o ano de 2050. Esta fase é fundamental para entender as possíveis evoluções do uso e cobertura da terra, considerando diferentes variáveis e critérios e, assim estimar as mudanças futuras.

Para o cenário preditivo, utilizamos como *input* a matriz de transição previamente calculada. Essa matriz é fundamental para modelar as probabilidades de mudança entre diferentes classes de uso da terra ao longo do tempo (Soares-Filho *et al.*, 2002). Além disso, integra-se à simulação o raster de uso e cobertura da terra observado para o ano de 2022 e os pesos de evidências calibrados na fase anterior.

Durante a simulação, a estrutura de repetição (FOR) é utilizada para inserir um lapso temporal anual, resultando na produção de vinte e oito *rasters* distintos para cada simulação, representando os anos de 2023 a 2050. Esta abordagem permite uma análise detalhada e contínua das mudanças espaciais ao longo do tempo, facilitando a identificação de tendências e padrões de evolução.

Para o cenário exploratório, além dos *inputs* utilizados no cenário preditivo, incorpora-se a variável com as áreas prioritárias para restauração. Essa variável adicional é inserida em todas as fases da modelagem, garantindo que esteja sinergicamente integrada ao contexto das paisagens dos cenários futuros. A inclusão de áreas prioritárias para restauração não só promove a conservação ambiental, mas também melhora a resiliência dos ecossistemas frente às mudanças climáticas.

3.3.4. Custo de oportunidade

No estudo sobre o custo de oportunidade, foi realizada uma comparação financeira detalhada para um período de um ano, focando em áreas de pastagem e sua possível conversão para Mata Atlântica. A análise começou com uma pesquisa abrangente sobre o valor do aluguel do hectare de pastagem, utilizando dados de instituições imobiliárias que operam nos 15 municípios onde a área de estudo está situada. A coleta de dados envolveu uma série de entrevistas e consultas com corretores locais e empresas especializadas, visando obter um panorama realista e atualizado dos valores de mercado. Após a obtenção dos valores de aluguel, calculou-se a média aritmética para identificar o valor central referente ao aluguel das áreas de pastagem. Esse valor médio é importante para a análise, pois serve como uma referência clara e objetiva dos custos envolvidos na manutenção das áreas de pastagem. A média obtida foi então multiplicada pelas áreas prioritárias para restauração, permitindo uma estimativa dos recebíveis totais dos proprietários rurais como aluguel dessas áreas para pastagem.

No contexto das oportunidades de recebimento, decorrentes da destinação de áreas para restauração florestal, foi adotado um valor de R\$ 300,00 por hectare/ano, conforme praticado na data do estudo para áreas de Mata Atlântica. Este valor foi determinado com base em estudos de caso e em acordos previamente estabelecidos em programas de restauração similares. Além desse valor, considerou-se também a potencial venda de créditos de carbono no mercado voluntário, onde a tonelada de carbono foi avaliada em US\$ 6,00. Este mercado tem se mostrado uma fonte crescente de renda, especialmente com o aumento da conscientização sobre a importância da sustentabilidade e a pressão internacional por ações concretas contra as mudanças climáticas.

Em sequência, foi realizada uma comparação entre os valores das terras destinadas à pastagem e aqueles valores caso fossem destinadas à restauração florestal. Esta comparação foi relevante para avaliar a viabilidade econômica da conversão de uso da terra.

4– RESULTADOS: ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO

Neste capítulo, apresentaram-se os resultados e análises decorrentes das três etapas sequenciais e complementares da pesquisa. Priorizou-se a análise da paisagem, com enfoque no mapeamento dos usos da terra para diagnosticar a configuração da paisagem atual. Empregou-se a modelagem determinística para identificar as principais localidades que necessitam de restauração ativa. Além disso, desenvolveu-se cenários futuros, até o ano de 2050, utilizando modelagem probabilística, objetivado a antecipar as possíveis transformações da paisagem. Por fim, elaborou-se o cálculo do custo de oportunidade entre áreas restauradas e pastagens.

4.1. Diagnóstico da paisagem

A análise comparativa das métricas de paisagem foi elaborada entre os anos de 1985, 2005 e 2022, baseando-se nas classes de uso da terra presentes no estudo. Os dados para as análises foram gerados no software Fragstats 4.2, priorizando-se a avaliação dos dados em nível de classe e paisagem. Em nível de classe, as principais métricas, incluem Cobertura de Área (CA), Porcentagem da Paisagem (PLAND), Número de Manchas (NP), Área Média (AREA_MN), Desvio Padrão da Área (AREA_SD), Média do Índice de Forma (SHAPE_MN), Desvio Padrão do Índice de Forma (SHAPE_SD), Distância Média até o Vizinho Mais Próximo (ENN_MN), Desvio Padrão da Distância até o Vizinho Mais Próximo (ENN_SD) e Coesão (COHESION). Já em nível de paisagem, aplicou-se o Índice de Riqueza de Classes (PR) e o Índice de diversidade de Shannon (SHDI).

Ao longo de quase quatro décadas, testemunharam-se transformações marcantes em diversas classes de uso da terra, evidenciadas pelas informações detalhadas na Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4. Notavelmente, a classe dedicada à mineração não exibiu alterações significativas, quando comparada ao tamanho total da área de estudo, portanto foi excluída desta análise particular.

Dentre as classes avaliadas, o café e a silvicultura merecem destaque. Embora ambos representem modalidades de agricultura, a singularidade e a importância dos seus cultivos justificaram uma avaliação distinta. Os corpos d'água, por sua vez, revelaram uma dinâmica

interessante, marcada pela variação em áreas de armazenamento artificial criadas para diversos propósitos. Essa mudança ilustra a capacidade humana de adaptar e modificar o ambiente natural para atender a necessidades específicas.

A análise revelou ainda que a pastagem e a formação florestal emergem como as classes de maior importância espacial na região estudada, destacando-se pela extensão de terras que ocupam. Essa observação sublinha a relevância desses usos da terra tanto para a economia local quanto para a conservação ambiental.

Por outro lado, o conceito de “mosaico de usos”, conforme descrito pelo Projeto Mapbiomas, identifica áreas de atividade agropecuária onde a distinção entre pastagem e agricultura não pôde ser claramente estabelecida. Esse fenômeno reflete a complexidade e a interdependência das práticas de uso da terra, evidenciando a necessidade de abordagens integradas para o seu gerenciamento. Finalmente, a classe urbana capturou a expansão das sedes municipais e o surgimento de novas áreas urbanizadas ao longo do período analisado.

Tabela 2: Métricas da paisagem 1985

Métricas	Agric.	Café	Silvic.	Corpos d'água	Form. Florestal	Pastagem	Mosaico de usos	Urbano
CA	347,4	2.457,2	112,3	7,6	45.480,3	73.661,5	36.194,4	45,4
PLAND	0,2	1,5	0,1	0,0	28,6	46,3	22,8	0,0
NP	326	1.783	83	10	2.958	1.912	6.241	16
AREA MN	1,1	1,4	1,4	0,8	15,4	38,5	5,8	2,8
AREA MD	0,8	0,8	0,9	0,7	1,8	1,3	1,2	1,6
AREA SD	1,0	2,0	2,1	0,5	343,6	759,0	22,9	3,5
SHAPE MN	1,6	1,7	1,4	1,2	1,6	1,5	1,9	1,5
SHAPE SD	0,5	0,6	0,3	0,2	0,8	1,4	1,2	0,3
ENN MN	662,7	232,4	1.471,8	6.289,0	135,6	112,0	90,2	2.658,8
ENN SD	736,6	276,6	1.493,2	3.356,8	95,4	81,0	50,0	4.290,8
COHESION	76,1	81,3	78,0	69,2	99,3	99,7	95,5	86,4
SHDI	1,4							
PR	11							

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3: Métricas da paisagem 2005

Métricas	Agric.	Café	Silvic.	Corpos água	Form. Florestal	Pastagem	Mosaico de usos	Urbano
CA	88,1	8.048,6	319,7	36,7	43.050,9	81.252,6	25.232,0	226,8
PLAND	0,1	5,1	0,2	0,0	27,1	51,1	15,9	0,1
NP	161,0	2.981,0	170,0	35,0	3.220,0	1.729,0	8.292,0	25,0
AREA MN	0,5	2,7	1,9	1,1	13,4	47,0	3,0	9,1
AREA MD	0,5	1,1	1	0,8	1,8	0,9	1	4,9
AREA SD	0,4	5,8	2,9	1,2	352,0	1.798,4	8,0	11,1
SHAPE MN	1,4	1,7	1,4	1,3	1,6	1,5	1,8	1,6
SHAPE SD	0,3	0,6	0,3	0,3	0,8	1,7	0,9	0,3
ENN MN	1.136,9	180,2	1.037,5	2.638,5	134,3	109,4	96,3	2.554,5
ENN SD	1.116,6	174,8	1.107,0	2.545,2	96,2	83,7	57,7	3.915,3
COHESION	64,5	88,7	83,6	77,4	99,2	99,9	91,4	92,4
SHDI	1,4							
PR	11							

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4: Métricas da paisagem 2022

Métricas	Agric.	Café	Silvic.	Corpos d'água	Form. Florestal	Pastagem	Mosaico de usos	Urbano
CA	499,9	13.253,9	3.631,0	44,5	46.662,7	65.491,7	27.768,8	407,2
PLAND	0,3	8,3	2,3	0,0	29,3	41,2	17,5	0,3
NP	703,0	3.347,0	1.127,0	44,0	3.540,0	2.344,0	9.304,0	19,0
AREA MN	0,7	4,0	3,2	1,0	13,2	27,9	3,0	21,4
AREA MD	0,6	1,3	1,3	1,3	0,8	1	1	11,6
AREA SD	0,9	9,9	7,9	0,6	334,9	530,6	7,6	23,0
SHAPE MN	1,4	1,7	1,5	1,3	1,7	1,6	1,8	1,8
SHAPE SD	0,4	0,6	0,4	0,3	0,9	1,4	0,9	0,4
ENN MN	542,0	163,1	349,6	2.200,3	120,9	113,5	90,0	3.916,1
ENN SD	507,8	146,7	342,2	2.116,3	80,2	83,3	48,5	4.380,5
COHESION	71,0	91,2	89,5	73,6	99,1	99,6	91,2	95,0
SHDI	1,5							
PR	11							

Fonte: Elaboração própria.

Formações florestais

No ano de 1985, a área total (CA) de formação florestal, na região estudada foi estimada em 45.480,3 hectares, o que representava 27% (PLAND) do território total. Deste montante, 6.742 hectares foram identificados dentro do PESB, ou seja, 15% de toda floresta se encontrava nos limites da UC. Avançando para o ano de 2005, no período de 20 anos, observou-se uma redução nas áreas de florestas de 2.492 hectares, totalizando 43.050 hectares. Apesar dessa diminuição, houve um incremento de 130 hectares na área coberta dentro da UC, alcançando-se 6.872 hectares. Tal resultado demonstrou a eficiência na função de conservação e proteção no PESB. Em 2022, a área total florestal foi elevada para 46.662,7 hectares, atingindo-se um aumento de 8,4% de formações florestais em 17 anos. Em mesmo sentido, o PESB também obteve um pequeno incremento de 8 hectares dessa classe, já que sua área se encontrava em bom estado de recuperação proveniente de anos anteriores. Assim totalizou-se nesse ano 6.880 hectares de área coberta por floresta. Essa transformação também é refletida na quantidade de fragmentos florestais na área.

Inicialmente, em 1985, havia 2.958 fragmentos (NP) ou manchas florestais, com uma mediana de área (AEA MD) de 1,8 hectares e um desvio padrão (AREA SD) de 343 hectares. Estes dados indicam que a maioria dos fragmentos florestais eram menores que 2 hectares, embora o desvio padrão aponte para a existência de manchas maiores, incluindo aquelas existentes no PESB. Em 2005, o número de fragmentos florestais aumentou para 3.220, enquanto a mediana de área manteve-se. Estes números evidenciam a continuação do processo de fragmentação das manchas naturais, particularmente aquelas de maior extensão, externas à UC. Já 2022, o número de fragmentos foram ainda maiores, somando-se 3.540, todavia, esta situação está atrelada com o aumento de áreas restauradas. Processos de restauração passivo e ativo certamente foram colocados em prática em propriedades rurais na área de estudo e o incremento florestal ocorreu, sobretudo em formações de pastagem no entorno do PESB.

A análise da métrica de forma média das manchas florestais (SHAPE_MN) revelou valores consistentes entre os dois primeiros anos analisados (1985 e 2005), ambos em 1,6. Já o terceiro ano (2022), constatou-se um aumento no valor da métrica para 1,7 condicionado pelas novas manchas de restauração. Esta complexidade incrementa a exposição das manchas ao efeito de borda, fenômeno que pode influenciar significativamente a dinâmica ecológica dessas áreas. Tal configuração das manchas florestais, evidenciada, sugere que as mesmas já exibiam

formas complexas mesmo antes do início do período de estudo, refletindo uma transição histórica nos padrões de uso da terra na região analisada. Manchas florestais que apresentam formas isodiamétricas, tais como círculos e quadrados, tendem a ser menos suscetíveis a interferências externas devido à sua menor complexidade morfológica. Normalmente, essas formas isodiamétricas possuem um valor de SHAPE_MN igual ou próximo a 0, o que indica uma menor complexidade em sua conformação, diferente dos valores encontrados entre os anos avaliados.

Ao ponderar a métrica da distância média até os vizinhos mais próximos (ENN_MN), observou-se uma diminuição de 135,5 metros no ano 1985 para 134,6 metros em 2005 e 120,9 em 2022. Entre 1985 e 2005, essa leve redução poderia sugerir um aumento na conectividade entre as manchas florestais. No entanto, essa mudança resultou principalmente da fragmentação de manchas maiores, que, ao se dividirem, esculpiram na paisagem novos fragmentos mais próximos entre si. Essa interpretação é reforçada pela leve queda no índice de coesão (COHESION). Já em 2022, a redução na distância foi resposta de novas áreas restauradas em propriedades rurais.

A manutenção de um valor elevado de coesão nos anos é atribuída principalmente à presença da UC na área central. O PESB desempenha um papel crucial na conexão entre diferentes fragmentos florestais, especialmente com aqueles localizados adjacentes a seu limite territorial. Essa situação ressalta a complexidade das dinâmicas de fragmentação e conectividade florestal, evidenciando que uma única métrica não pode fornecer uma compreensão completa desses processos. Portanto, a análise conjunta de várias métricas é fundamental para uma interpretação mais precisa e abrangente das mudanças na paisagem.

Em relação às métricas de paisagem, sendo elas a riqueza de classes (PR) e o índice de diversidade de Shannon (SHDI), ambas apresentaram valores que permaneceram praticamente estáveis, sendo 11 e 1,4 respectivamente. Isso indica uma limitada diversidade na paisagem medida e observada. O leve aumento aferido no SHDI para 1,5, em 2022, pode ser atribuído à expansão das áreas dedicadas ao café e à silvicultura.

Pastagem

A pastagem constitui a categoria com maior área no espaço analisado, decorrente de um processo histórico de ocupação. Em 1985, esta categoria ocupava 46,3% da área, aumentou para 51,1% em 2005 e reduziu para 41,2% em 2022. Sua predominância se destaca, sobretudo, nas propriedades rurais e nas proximidades das sedes municipais. Apesar da sua vasta extensão, a pecuária utiliza apenas parcela dessa cobertura.

A análise da área média das pastagens também reflete as alterações observadas. A área média por pastagem expandiu de 38,2 hectares em 1985 para 47 hectares em 2005. No entanto, em 2022, a área média dos fragmentos de pastagem diminuiu para 27,9 hectares, indicando uma transição para cultivos como café e eucalipto, além da substituição por áreas urbanas e reflorestamento.

Em relação à coesão entre os fragmentos de pastagem, observou-se os maiores valores quando comparada com outros usos da terra, com 99,7 em 1985; 99,9 em 2005; e uma leve redução para 99,6 em 2022. Mesmo com essa diminuição na coesão, o número de fragmentos de pastagem permaneceu inferior ao das formações florestais, evidenciando uma conexão elevada. Apesar da redução nessa métrica, as pastagens ainda mantêm uma presença significativa na paisagem e representam a categoria com maior potencial para projetos de restauração florestal.

Agricultura, café, silvicultura e mosaico de usos

A agricultura na área em estudo se fundamenta na produção de feijão, milho, banana e uma diversidade de hortaliças. Esta produção é típica de pequenas propriedades que buscam diversificar seus cultivos, primordialmente para suprir a demanda local. Em 1985, as áreas destinadas a esses cultivos representavam 0,2% do total, equivalendo a 347,4 hectares. Já em 2005, observou-se uma diminuição dessas áreas para 0,1% (88,1 hectares). Em 2022, houve um aumento para 0,3% do total (mais 499,9 hectares). A média da área de cultivo em 1985 era de 1,1 hectares, distribuída em 326 fragmentos. Para o ano de 2005, a média do cultivo reduziu para menos da metade do valor inicial, situando-se em 0,5 hectares com 161 fragmentos, indicando uma redução das áreas plantadas e uma substituição significativa por pastagem. Em

2022, com o incremento na agricultura, a área média cultivada subiu levemente para 0,7 hectares, porém o aumento mais notável foi no número de fragmentos, que alcançou 703.

A Zona da Mata, em Minas Gerais, é uma região privilegiada para a produção de café, graças às suas condições climáticas, de solo, altitude dentre outros. O solo fértil aliado a um clima úmido, com temperaturas amenas, proporciona o ambiente adequado para o cultivo dos grãos de café. A altitude, variando entre 800 e 1.300 metros, é um dos fatores que influencia diretamente na qualidade do café produzido. O município de Araponga, junto com seus vizinhos como Viçosa, Muriaé e Manhuaçu, destaca-se na produção de cafés de alta qualidade, sendo reconhecidos nacional e internacionalmente.

O cultivo de café se destacou ao utilizar 1,5% da área (2.457,2 hectares) no primeiro ano avaliado. Em 2005, a área destinada ao grão quase quadruplicou, alcançando 5,1% (8.048,6 hectares). Seguindo a tendência de crescimento aquecida pelo mercado consumidor, expandiu-se para 8,1% em 2022 (13.253,9 hectares). A área média destinada ao plantio de café também passou por crescimentos constantes ao longo dos anos avaliados, sendo de 1,4 hectares em 1985; 2,7 hectares em 2005; e 4,0 hectares em 2022. Da mesma forma, o número de áreas plantadas aumentou consistentemente, registrando-se 1.738 áreas em 1985, 2.981 em 2005, e 3.347 em 2022.

Outra produção em destaque na área de estudo é o plantio de eucalipto. A silvicultura é uma atividade em expansão na Zona da Mata. Essa região de Minas Gerais, oferece condições climáticas e de solo favoráveis ao cultivo de diversas espécies de árvores, tanto nativas quanto exóticas. O clima úmido e a boa distribuição de chuvas ao longo do ano, aliados à fertilidade dos solos, tornam a Zona da Mata um local propício para a prática da silvicultura, fato este registrado na expansão das manchas entre os anos analisados na área de estudo. Municípios como Juiz de Fora, Ponte Nova, Muriaé e Leopoldina são notáveis pela silvicultura. Estas áreas são reconhecidas pelo cultivo de eucalipto e pinus, destinados principalmente à indústria de papel e celulose, além da produção de madeira para serrarias, carvão e outros usos industriais. A silvicultura ocupava 0,1% (112,3 ha) da área de estudo em 1985. Em 2005, a área foi dobrada para 0,2% (309,7 ha). Contudo, o maior aumento ocorreu entre os anos de 2005 a 2022, em que se registrou aumento de mais de 1.000%, tendo-se a ocupação pela classe de 2,3% que correspondem a 3.631 hectares disponibilizados à silvicultura. Obteve-se o aumento no número

de terrenos plantados em cada ano (83, 170 e 1.127), bem como no tamanho médio das áreas (1,4 ha; 1,9 ha e 3,2 ha).

Uma das principais preocupações quanto a expansão da silvicultura é o impacto negativo sobre o solo. A planta tem alta capacidade de absorver água, o que ocasiona a diminuição da disponibilidade hídrica nas áreas cultivadas. Isso impacta negativamente não só as áreas de cultivo, mas também outras áreas adjacentes. Essa característica pode resultar em secas locais e na redução da biodiversidade, pois a escassez de água limita o crescimento de espécies nativas, que não conseguem competir com o eucalipto por recursos hídricos. Além disso, monoculturas extensas de eucalipto podem levar à diminuição da fertilidade do solo a longo prazo, devido à rápida depleção de nutrientes essenciais, e à perda de biodiversidade, uma vez que poucas espécies animais e vegetais resistem em ambientes homogêneos. Portanto, é crucial adotar práticas de manejo em áreas de silvicultura, para minimizar os impactos negativos no ambiente e ainda garantir a produtividade econômica.

O mosaico de uso do solo refere-se a áreas com difícil identificação em termos de ocupação efetiva da terra. Comumente, estas áreas são designadas para atividades agrícolas e de pastagem, situando-se, portanto, nas fronteiras entre esses dois tipos de uso da terra. A agricultura praticada nestas zonas tende a ser temporária, dando lugar à expansão natural da pastagem em certas épocas do ano, o que torna desafiadora a classificação precisa do uso da terra. Devido à sua extensão e por representar uma potencial zona de transição para a pastagem — considerada de menor valor ambiental e econômico —, esta classe requer atenção especial.

Em 1985, o mosaico de uso abrangia 22,8% da área total, equivalente a 36.194,4 hectares, e apresentava um alto número de fragmentos, totalizando 6.241. Essa fragmentação é atribuída à presença dessas áreas principalmente em propriedades rurais, que somavam 7.751. Já em 2005, houve uma diminuição da proporção desta classe para 15,9% (25.232 hectares), mas com um aumento no número de fragmentos para 8.292, período que também coincidiu com a maior expansão de pastagens. Isso sugere que uma parte significativa da conversão do mosaico de uso foi destinada a essa finalidade. Em 2022, observou-se um ligeiro aumento na área ocupada por esse mosaico para 17,5% (27.768,8 hectares), acompanhado de um aumento no número de fragmentos para 9.304. O crescimento contínuo no número de fragmentos ao longo dos anos indica uma maior segmentação do mosaico em partes menores, principalmente devido ao avanço da pastagem entre essas subdivisões.

Urbano

Como já mencionado anteriormente, a área de estudo abriga quatro centros urbanos: Araponga, Sericita, Pedra Bonita e Rosário da Limeira. Além das sedes municipais, a região conta também zonas rurais povoadas, originárias tanto desses municípios quanto de outros que compõem a área investigada. Cabe destacar que, devido ao tamanho do pixel de 30x30 metros algumas estruturas urbanas de menor tamanho não foram identificadas nos *rasters*.

No ano de 1985, as áreas urbanas ocupavam 45,4 hectares, distribuídos em 16 manchas urbanas. Até 2005, essa extensão aumentou para 226,8 hectares, com o número de manchas urbanizadas crescendo para 25. No início, a área urbana representava um valor relativamente baixo, mas em 2005, alcançou 0,1% da área total. Em 2022, observou-se um aumento significativo na extensão urbana, que atingiu 0,3% da área total, correspondendo a 407,2 hectares. Apesar desse aumento, houve uma redução no número de manchas urbanas para 19, explicada pela fusão estrutural entre povoados próximos, resultando em uma única mancha urbana.

A expansão urbana contínua ao longo dos anos é corroborada pela métrica da área média. Em 1985, a média era de 2,8 hectares, com um desvio padrão de 3,5 hectares. Em 2005, a média aumentou para 9,1 hectares, com um desvio padrão de 11,1 hectares. Já em 2022, a média das áreas urbanas foi de 21,4 hectares, com um desvio padrão de 23 hectares. O aumento nos valores dos desvios padrões reflete principalmente a expansão das sedes municipais, que representam as maiores manchas urbanas registradas.

Corpos d'água

Os corpos d'água na área em estudo são constituídos por rios, ribeirões, lagoas e lagos artificiais. Assim, como o urbano, alguns corpos hídricos não foram identificados nas imagens de resolução de 30x30 metros. Notavelmente, o PESB funciona como um divisor de águas entre as bacias dos rios Doce e Paraíba do Sul, apresentando um vasto número de nascentes que fornecem água para os ribeirões e rios. Dentro da bacia do rio Doce, os principais rios identificados na área de estudo incluem o rio Casca, o rio Santana e o rio Matipó. Por outro lado, na bacia do rio Paraíba do Sul, o rio Glória é particularmente proeminente.

A área de estudo é eficientemente drenada pelas redes hídricas, uma condição que favorece a disponibilidade de água para consumo humano e animal, agricultura, além de beneficiar os serviços ecossistêmicos locais. Em 1985, a extensão dos corpos d'água era de apenas 7,6 hectares, distribuídos em 10 fragmentos. A maior parte dessa medida estava relacionada aos principais rios e córregos. Até 2005, a área coberta por água aumentou significativamente para 36,7 hectares, contando com 35 fragmentos. Já em 2022, essa área alcançou 44,5 hectares com 44 fragmentos. A expansão da área aquática deve-se, em grande parte, à formação de lagos artificiais destinados a usos agropecuários e recreativos.

Uma preocupação crescente diz respeito à proteção das nascentes e corpos hídricos. O processo de secagem do solo, provocado pela remoção da cobertura vegetal, afeta diretamente com a diminuição das nascentes. Além disso, a falta de manutenção das áreas de proteção permanente, resulta no aumento do depósito de sedimentos nos corpos d'água, levando ao assoreamento e à redução da qualidade da água.

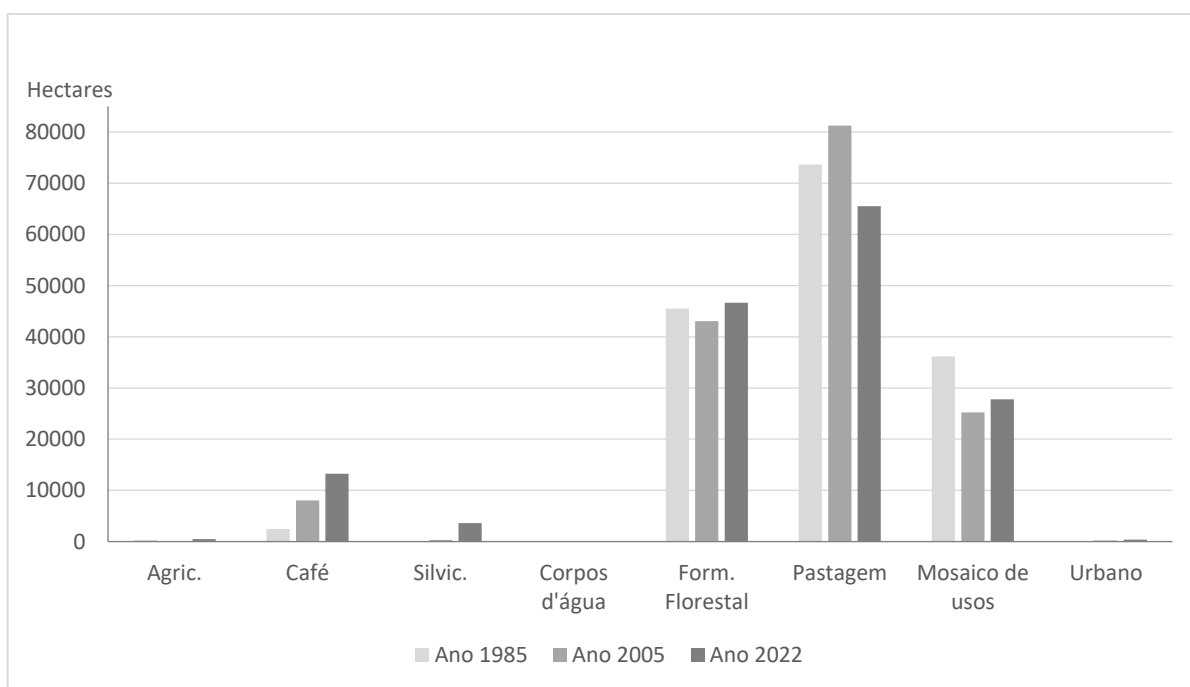
4.1.2. Análise espacial integrada das classes de uso da terra

As transformações observadas nas categorias de uso da terra da região analisada foram marcadas por relações históricas entre aspectos sociais, econômicos, ambientais, tecnológicos, políticos e de valores, conhecidos na literatura como STEEPV (IPBES, 2016a; Loveridge, 2016). As métricas avaliadas, embora quantitativas, possibilitaram análises que revelaram aspectos qualitativos relacionados a mudanças espaciais. Os dados coletados indicaram avanços em certos usos da terra e retrocessos em outros, evidenciando-se configurações espaciais governadas por forças variadas atuantes no território.

No contexto da paisagem, as métricas confirmaram a heterogeneidade presente na área de estudo. O alto número de categorias resultou em um elevado Índice de Shannon (SHDI) e riqueza de fragmentos (PR). Contudo, isso não significa a presença de uma paisagem com diversidade ampla e estabilidade ambiental. Observou-se a persistência de fragmentos influenciados por uma intensa hemerobia, já existente antes do primeiro ano analisado (1985), como a pastagem e mosaico de uso. Como já exposto, dentre os usos da terra, a pastagem comprovou imperatividade entre os anos, conforme o Gráfico 1, apesar de uma redução constatada no ano de 2022. A redução de áreas de pastagem ocorreu às custas da ampliação de

outros usos, sobretudo para o plantio de café e eucalipto. A cafeicultura demonstrou, a cada ano, crescimentos expressivos. Já a silvicultura, adquiriu maior presença territorial no ano de 2022.

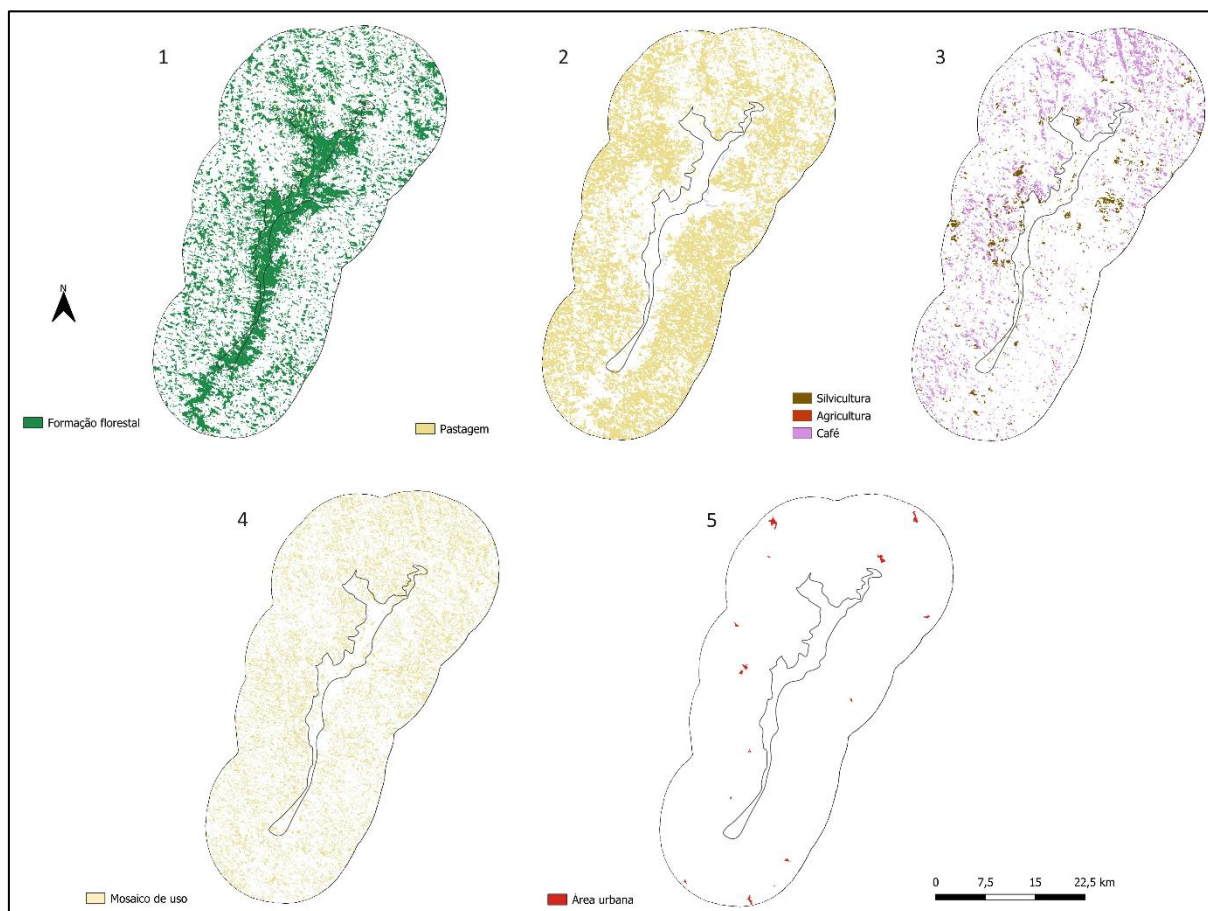
Gráfico 1: Área de uso da terra entre os anos 1985, 2005 e 2022 no entorno do PESB



Fonte: Elaboração própria.

As categorias de uso da terra apresentam padrões de distribuição que revelam características capazes de contribuir para a elaboração de um diagnóstico espacial. Nesse contexto, as categorias mais significativas, no que se refere às alterações paisagísticas, foram documentadas na Figura 5. O estágio exposto dos usos da terra é referente ao ano de 2022, por trazer melhor proximidade a atual configuração na área estudada.

Figura 5: Principais usos da terra no ano de 2022



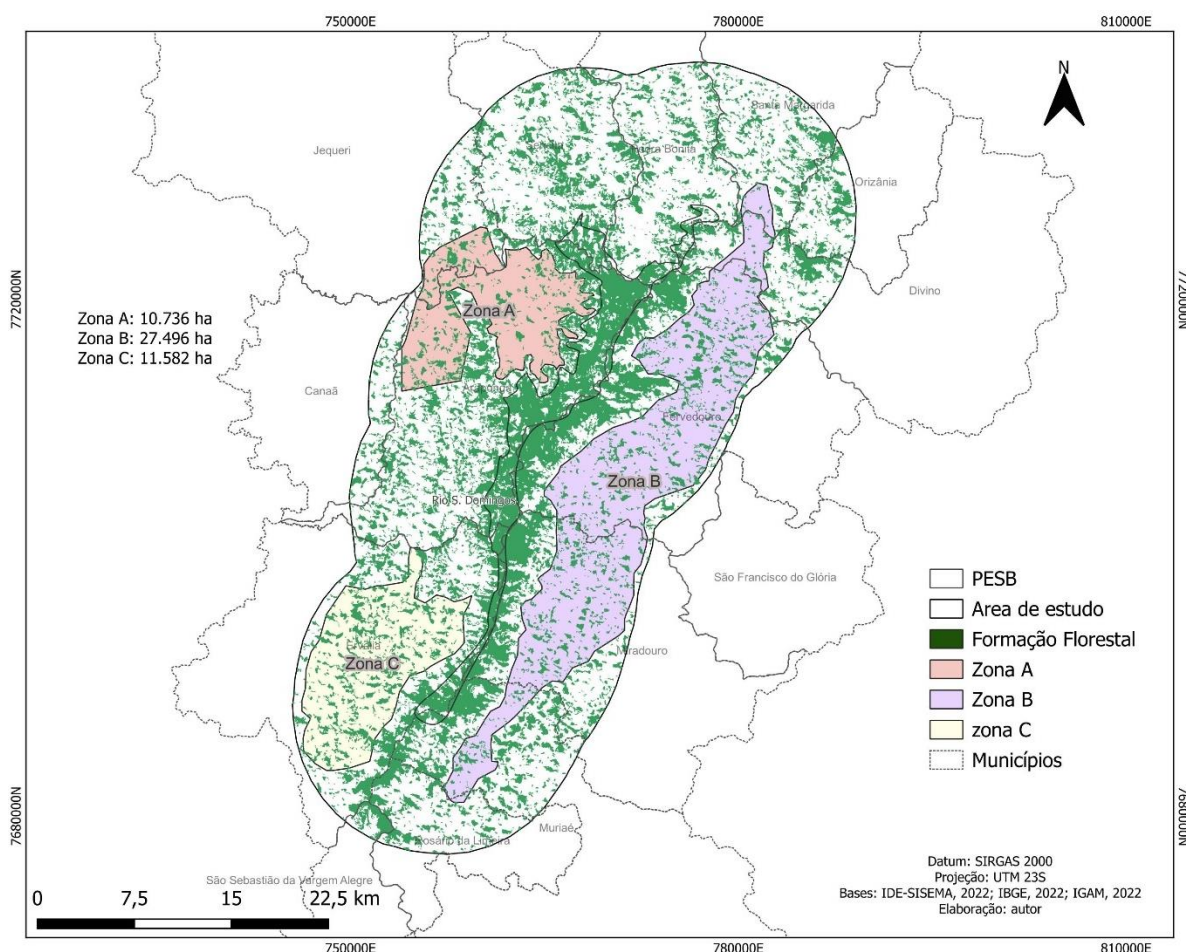
Fonte: Elaboração própria.

Antes da criação do PESB em 1996, a área designada para os limites do parque já apresentava uma significativa concentração florestal, especialmente quando comparada à vizinhança, composta majoritariamente por propriedades rurais. Esse fenômeno foi influenciado por características do relevo, como a pronunciada declividade e altimetria, fatores que restringiram o avanço das atividades agropecuárias na região. A instituição da UC progrediu de forma positiva, alcançando a marca de 130 hectares restaurados até 2005. Durante o mesmo intervalo de tempo, nota-se que ocorreu um processo inverso no entorno do PESB: o desflorestamento levou a uma diminuição das áreas florestais em 2.492 hectares, favorecendo outros usos do solo. A concentração atual das manchas florestais segue similar a imagem 1 presente na Figura 5.

Considerando que a formação florestal é a categoria de maior importância para o contexto desta pesquisa, particularmente no que se refere à produção de serviços

ecossistêmicos, como o sequestro de carbono e a geração de água, essa foi documentada na Figura 6. A figura destaca detalhes relevantes sobre a configuração das áreas florestais e sua distribuição.

Figura 6: Distribuição da formações florestais na área de estudo 2022



Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar visualmente a Figura 6, observa-se que as áreas florestais demonstram uma conexão mais intensa no eixo nordeste-sudoeste (região central), de forma similar ao parque. Na porção sul do PESB, ao longo da cadeia serrana, nota-se a preservação de áreas florestais mais extensas e próximas umas das outras, abrangendo partes dos municípios de Ervália, São Sebastião da Vargem Alegre, Rosário da Limeira e Muriaé. Em mesmo sentido, ao norte e a oeste, incluindo partes dos municípios de Divino, Orizânia, Santa Margarida, Sericita, Jequeri e Araponga, também se encontram áreas florestais de tamanho acima da média, conforme a

métrica de área média. Contudo, estas apresentam um espaçamento maior entre si, indicando uma menor conexão, quando comparada com a porção sul.

Especificamente na região oeste, a sudeste do município de Jequeri e ao norte do município de Araponga, identifica-se uma exceção ao padrão de distribuição das áreas florestais, marcada como zona (A) com 10.736 hectares na Figura 6. Esta área se caracteriza por fragmentos florestais menores e por uma reduzida interconexão entre eles. No mesmo contexto, a zona (B) com 27.496 hectares, localizada ao leste do parque e abrangendo partes dos municípios de Santa Margarida, Divino, Fervedouro, Miradouro e Muriaé, exhibe áreas florestais com tamanho e conexões mais frágeis. De maneira similar, a zona (C) com 11.582 hectares, situada em um segmento central do município de Ervália, é destacada.

Em relação a pastagem, observa-se na imagem 2, apresentada na Figura 5, que as maiores concentrações dessa cobertura se localizam precisamente nas zonas que exibem maior vulnerabilidade florestal, como demonstrado na Figura 6. A cafeicultura, por sua vez, destacou-se mais ao norte e oeste do PESB, embora esteja presente em toda a área. Como é uma cultura permanente, ela se encontra frequentemente próxima a formações florestais em boa associação. Sua expansão foi notável, principalmente após o ano de 2005, ocorrendo principalmente pela substituição de áreas de pastagem e de uso misto.

A silvicultura também aumentou em 2005, mas teve um aumento exponencial no ano de 2022. As maiores áreas observadas na imagem 3 da Figura 5 estão localizadas nos municípios de Araponga (oeste) e Fervedouro (leste). A expansão do eucalipto, em grande parte, aconteceu sobre áreas anteriormente dedicadas à pastagem e ao uso misto. Quanto ao mosaico de uso, estas áreas funcionam como ecótonos entre zonas agricultáveis e de pastagem, apresentando uma distribuição homogênea pela área de estudo. Elas podem se tornar importantes para a restauração florestal, especialmente porque o custo de oportunidade é relativamente baixo quando comparado ao de outras atividades econômicas locais.

Já as áreas urbanas representam as sedes municipais, bem como demais áreas urbanizadas dos municípios. Apesar de serem pequenas áreas, quando comparado com outros usos, registrou-se um crescimento de 8,9 vezes entre os anos finais e iniciais.

4.2. Resultados e análises da modelagem determinística

O modelo foi desenvolvido com o objetivo de identificar as áreas mais adequadas para restauração florestal nas proximidades do PESB, levando em consideração a produção de biomassa e água. Os resultados obtidos poderão ser integrados a programas de PSA que visam esses objetivos, envolvendo os atores locais no processo. Na região estudada, existem 7.751 propriedades rurais, sendo que a maioria (6.624) possui menos de um módulo fiscal. Essas propriedades estão legalmente desobrigadas de recuperar certas áreas degradadas anteriores a 2008, conforme estipula o Código Florestal. Portanto, é essencial que sejam propostas medidas que incentivem e promovam uma maior participação dos atores locais, a fim de ocasionar mudanças no paradigma do uso da terra em zonas rurais. Considerando os altos custos da restauração, a identificação de áreas-alvo também permite a implementação de ações estratégicas mais eficazes.

Para essa finalidade, adotou-se uma abordagem baseada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizando variáveis pertinentes à restauração que já foram exploradas em estudos anteriores. As variáveis foram manipuladas no Qgis Desktop 3.30.2 em formato *raster*, com resolução de pixel de 30 metros e em uma mesma projeção plana. Essas variáveis serviram como insumos para definir os fatores e as restrições à restauração florestal. Todas as variáveis foram geradas dentro de um retângulo envolvente, delimitado pelas coordenadas 20°26'13"S, 42°38'48"O e 20°58'58"S, 42°13'10"O. Variáveis relacionadas ao distanciamento de um elemento espacial, como corpos hídricos e manchas florestais, foram calculadas utilizando a métrica euclidiana em uma escala contínua em metros. Outras variáveis foram processadas com valores específicos obtidos em servidores de dados abertos e publicações científicas.

Após a preparação dos dados, elaborou-se o modelo utilizando a técnica AHP-CLP, que resultou na atribuição dos pesos das variáveis e no modelo final. Uma vez completados os processamentos necessários, as variáveis foram normalizadas e ajustadas aos limites da área de estudo.

4.2.1. AHP-CLP

As metodologias empregadas no AHP-CLP mostraram-se adequadas e pertinentes aos resultados alcançados. Tal consistência, deve-se à adoção da sequência lógica desenvolvida por Saaty (1990), fundamental para estruturar a tomada de decisão em problemas complexos. Após

a criteriosa seleção e definição das variáveis, procedeu-se à comparação destas dentro de uma matriz pareada, conforme ilustrado na (Tabela 5). Nesta matriz, atribuíram-se notas de importância para cada variável em relação às demais, seguindo um processo sistemático de avaliação que se repetiu para todas as comparações possíveis. Na sequência do processo, calculou-se o peso das variáveis utilizando o método do autovetor, que envolve o somatório dos valores de cada linha dividido pelo somatório dos valores de cada coluna da matriz pareada (Tabela 5).

Tabela 5: Resultados da matriz de comparação pareada

Critério (fator)	Dist. Corpos hídricos	Dist. manc. naturais	Erodibilid. do solo	Fator LS	T. carbono no solo	Peso
Dist. Corpos hídricos	1	2	3	5	7	0,39
Dist. manc. naturais	0,5	1	3	4	6	0,31
Erodibilid. do solo	0,33	0,33	1	2	4	0,17
Fator LS	0,20	0,25	0,50	1	2	0,09
T. carbono no solo	0,14	0,17	0,25	0,50	1	0,04
Total	2,18	3,75	7,75	12,50	20,00	1,00

Fonte: Elaboração própria.

Posteriormente, procedeu-se ao cálculo do Índice de Consistência (IC) e da Razão de Consistência (RC), conforme metodologia estabelecida por Saaty (1991). Esses cálculos são essenciais para garantir que as comparações entre as variáveis não contenham distorções arbitrárias. A RC é particularmente importante, pois deve ser inferior a 10% para assegurar a coerência dos resultados. No estudo em questão, o valor obtido para foi de 0,9%, indicando uma distribuição de pesos entre as variáveis adequada e consistente.

Essa etapa é relevante para validar a confiabilidade do modelo desenvolvido, assegurando que as indicações baseadas nos resultados sejam fundamentadas em avaliações sistemáticas e rigorosas das variáveis envolvidas. A precisão na determinação dos pesos contribui diretamente para a eficácia do modelo espacial na aplicação prática, facilitando a

implementação de estratégias de gestão e conservação ambiental com base em evidências científicas.

Em sequência, os critérios fatores foram detalhadamente apresentados, acompanhados de seus resultados numéricos e espaciais, cada um submetido a análises específicas. Essa etapa é importante para entender como cada variável influencia a definição das áreas prioritárias para restauração florestal.

Para cada critério, foram fornecidos dados quantitativos que permitiram uma avaliação das condições biofísicas da área estudada. Esses resultados numéricos são complementados por representações espaciais que ilustram a distribuição e a intensidade de cada variável dentro da área de estudo. Essas representações visuais são essenciais para identificar padrões espaciais e áreas-chave para intervenção.

4.2.2 Análise das variáveis espaciais

As variáveis espaciais adotadas no modelo foram predominantemente de natureza biofísica, refletindo diretamente a necessidade de critérios objetivos para a definição de áreas aptas à restauração florestal. Entre estas variáveis incluem-se a distância dos corpos hídricos, a distância das manchas florestais, a erosibilidade do solo, o fator LS, e a taxa de carbono presente no solo. Estes elementos são fundamentais para avaliar a adequação e a vulnerabilidade ambiental das áreas consideradas.

Por outro lado, variáveis de caráter socioeconômico foram incorporadas neste modelo com a função específica de delimitar restrições, identificando áreas menos propícias para a restauração florestal. Essas incluem manchas urbanas, corpos d'água, formações naturais e áreas destinadas à agricultura. A inclusão dessas variáveis socioeconômicas visa evitar intervenções em regiões onde a restauração poderia conflitar com usos estabelecidos da terra ou com a infraestrutura existente.

Distância dos corpos hídricos

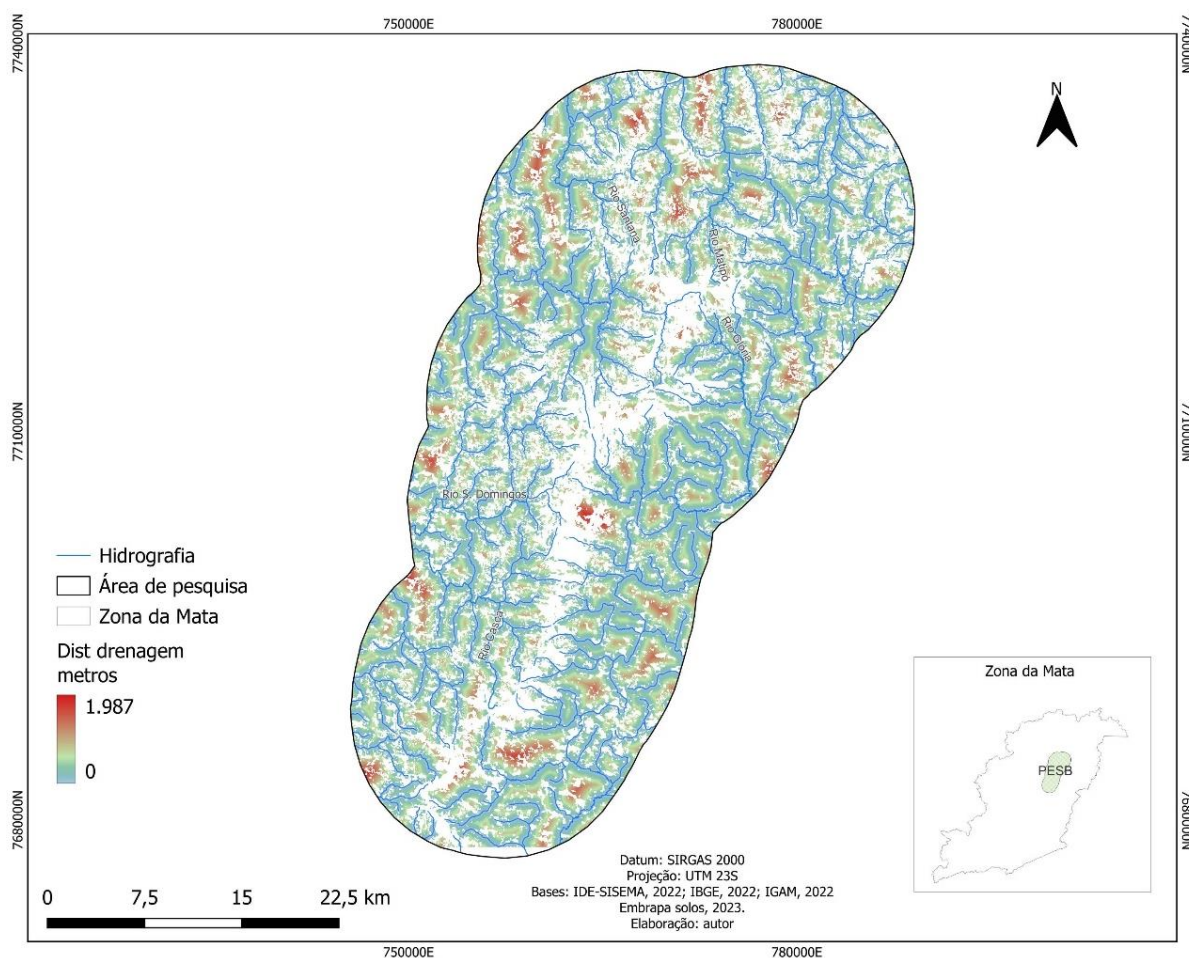
No que se refere à hidrografia, a área de estudo é dissecada por rios que integram as bacias do rio Doce (leste) e do rio Paraíba do Sul (oeste), com o relevo do PESB atuando como

divisor de águas. Os principais rios da bacia do rio Doce incluem o Matipó, Santana, Casca e São Domingos, enquanto na bacia do rio Paraíba do Sul destaca-se o rio Glória. Em ambas as bacias, o padrão de drenagem é dendrítico, caracterizado por rios principais que coletam afluentes ramificados em várias ordens. Essa estrutura hidrográfica favorece uma distribuição eficiente de água na região, essencial para a manutenção da biodiversidade, o abastecimento humano e as atividades agropecuárias locais. Diante disso, a proteção das áreas adjacentes aos corpos hídricos se torna uma estratégia relevante tanto para a conservação do recurso hídrico quanto para o cumprimento da legislação pertinente.

A preparação da variável resultou na criação do *raster* exibido na Figura 7. Neste *raster*, as distâncias são representadas gradativamente a partir dos corpos hídricos, alcançando os valores mais altos em áreas marcadas por uma coloração avermelhada. Esta graduação de cores facilita a visualização da proximidade relativa às fontes de água, um critério importante para determinar áreas prioritárias.

A representação em colometria avermelhada indica regiões mais distantes dos corpos hídricos, sugerindo locais onde a intervenção para restauração pode ser menos urgente ou prioritária, comparativamente às áreas mais próximas, que podem requerer atenção mais imediata devido à sua proximidade com o recurso.

Figura 7: Distância dos corpos hídricos



Fonte: Elaboração própria.

Esta variável foi considerada a mais influente no modelo AHP, alcançando o maior peso com um valor de 0,39. Isso indica que, dentro da hierarquia de importância estabelecida para os critérios de restauração florestal, a distância em relação aos corpos hídricos é um fator predominante na avaliação das áreas adequadas para intervenção. A atribuição deste peso considerável reflete a significativa relevância ecológica e estratégica que os recursos hídricos possuem no contexto de recuperação e conservação ambiental.

Distância das manchas florestais

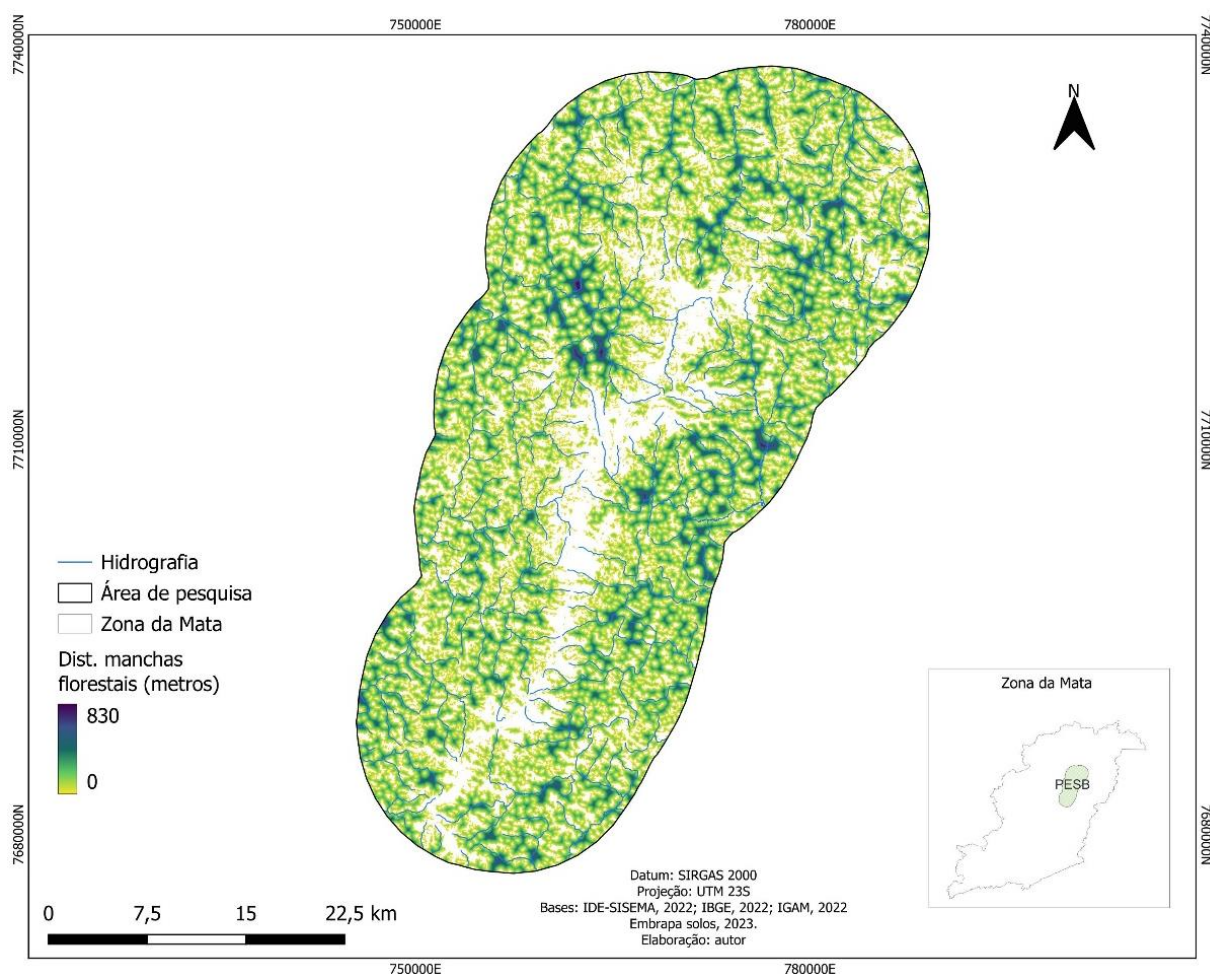
As manchas florestais existentes na área de estudo são também fundamentais na elaboração do modelo. Apresentou o peso de 0,31, sendo o segundo maior peso na modelagem.

Os remanescentes florestais, ao apresentarem quantidade e tamanho adequados, desempenham um papel crucial na criação de corredores ecológicos que se conectam a manchas maiores, como as encontradas no PESB. Além de facilitar a transferência biogênica de espécies pelo território, essas manchas funcionam como bancos de sementes, essenciais para a regeneração natural e o enriquecimento da diversidade vegetal local.

O aumento e a expansão dessas áreas florestais não apenas promovem uma maior biodiversidade, mas também são cruciais para assegurar a mobilidade da fauna. No que se refere à captura de CO₂e, as espécies da Mata Atlântica desempenham um papel relevante, armazenando cerca de 50% de sua biomassa em forma de carbono não reativo. Essa capacidade de sequestro e aprisionamento de carbono transforma as áreas florestais e os restauração florestal ferramentas importantes para a mitigação das mudanças climáticas, podendo ser aplicada como um ativo no mercado de carbono.

Espacialmente, foram delineadas as áreas mais próximas e aquelas com maior afastamento das manchas florestais (Figura 8). No mapa, as áreas próximas a fragmentos florestais estão representadas em amarelo, já áreas de maior distância estão destacadas na cor roxa em uma escala de 830 metros, facilitando a visualização das regiões com menor prioridade para ações de restauração.

Figura 8: Distância das manchas florestais



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que as áreas com maior afastamento das manchas florestais são, em grande medida, ocupadas por pastagens. Este padrão indica uma significativa alteração do uso original do solo, onde as áreas anteriormente florestais foram convertidas para atividades agropecuárias. É importante ressaltar a presença significativa de pastagens, inclusive nas margens dos cursos de água, o que aumenta o carreamento de sedimentos para os corpos hídricos. Esta condição contribui para a degradação da qualidade da água, uma vez que a erosão das margens desprotegidas facilita a transferência de sedimentos e poluentes para os rios e ribeirões.

As manchas florestais desempenham um papel crucial na mitigação desse impacto, atuando como barreiras naturais que ajudam a filtrar e reter sedimentos antes que estes alcancem os cursos d'água. Além disso, a vegetação ribeirinha ajuda a estabilizar as margens dos rios, reduzindo a erosão e o consequente carreamento de sedimentos. Portanto, a presença e a

conservação das manchas florestais têm uma influência positiva direta na manutenção da qualidade e da quantidade de água na área de estudo, com pontuação de necessidades estratégias de restauração, que incluam o reforço e a expansão dessas áreas florestais essenciais. A identificação dessas áreas oferece uma oportunidade real para iniciativas de restauração que visam não apenas aumentar a cobertura florestal, mas também restaurar a biodiversidade, melhorar a qualidade da água/solo e aumentar o sequestro de carbono.

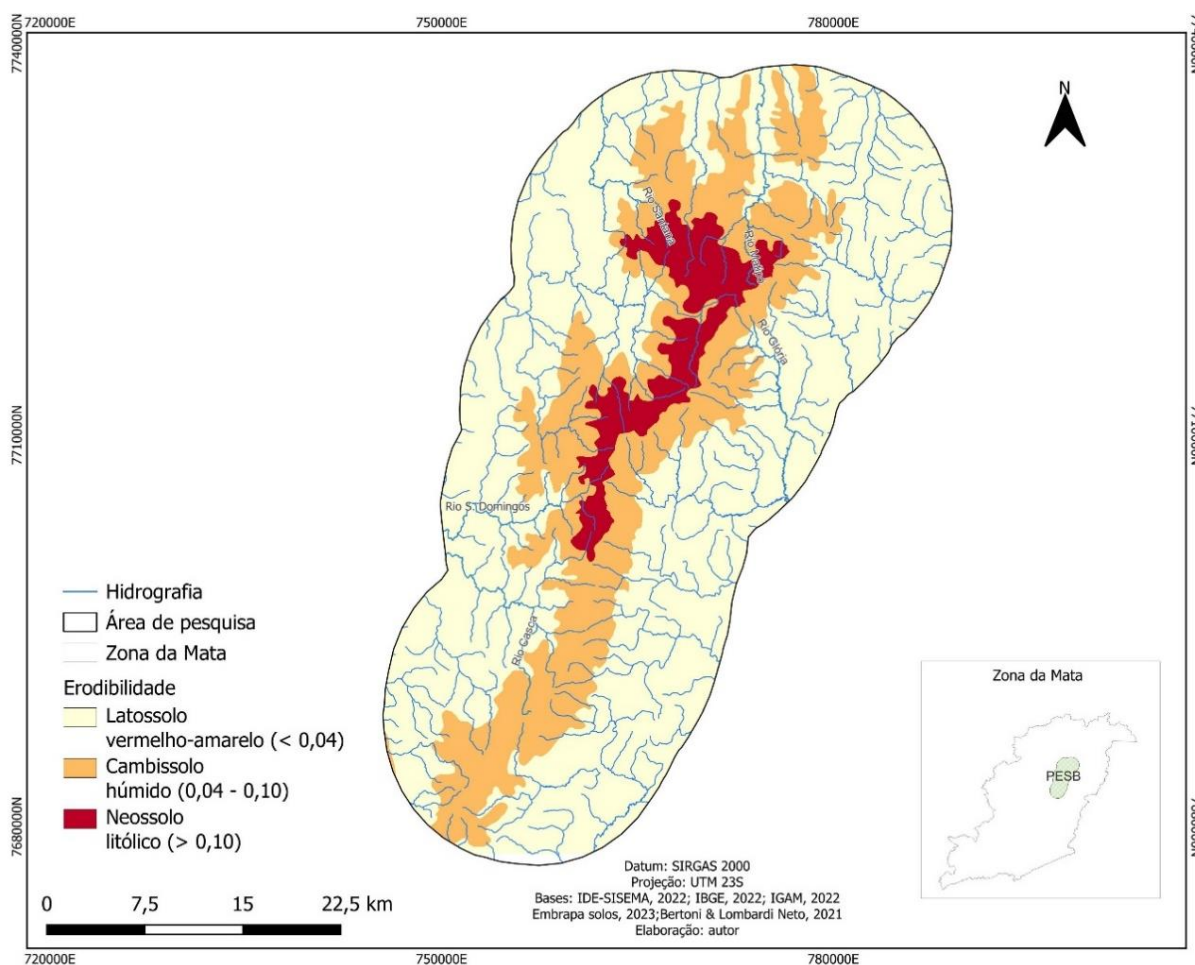
A promoção da restauração florestal é imperativa, não apenas para formar novas áreas de reserva de carbono e biodiversidade, mas também para manter os ecossistemas existentes. Florestas restauradas podem sequestrar até cinco toneladas de CO₂ por hectare anualmente. Em mesma medida, a manutenção de florestas tropicais maduras pode armazenar entre 150 a 250 toneladas de carbono por hectare. Esta dinâmica espacial contribui significativamente para serviços ecossistêmicos como regulação climática, purificação de água e conservação da biodiversidade, enfatizando a importância de ambos os esforços: restauração e conservação.

Erodibilidade do solo

A erodibilidade do solo indica a taxa na qual as partículas se desprendem durante períodos de chuva. Cada tipo de solo apresenta uma taxa específica, determinada por seus componentes químicos, físicos e biológicos, que conferem sua estrutura. Essa variável é importante para ações ambientais, pois permite entender a fragilidade de cada setor em uma área de estudo.

No método AHP, a erodibilidade ocupou a terceira posição em termos de importância, com um peso de 0,17. Os valores de erodibilidade adotados, basearam-se no levantamento de Bertoni & Lombardi Neto (2012) sobre a erodibilidade dos solos similares aos existentes na área de estudo (Figura 9).

Figura 9: Erodibilidade do solo



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 9, observa-se a presença de três classes de solos, conforme a classificação Brasileira de solos. O Neossolo Litólico, encontrado nas áreas mais elevadas do PESB, caracteriza-se por sua rochiosidade superficial e pouco desenvolvimento pedológico, apresentando alta taxa de erodibilidade devido à sua baixa coesão e alta permeabilidade. Esse solo, quando exposto, libera quantidade significativa de sedimentos. Sua localização dentro da unidade de conservação é estratégica para a proteção tanto do solo quanto dos recursos hídricos, especialmente as nascentes localizadas à jusante.

O Cambissolo Húmido, situado nas vertentes alongadas que seguem as áreas de maior altitude, é conhecido por seu perfil moderadamente profundo e sua boa capacidade de retenção de água e nutrientes, o que reduz sua erodibilidade em comparação com o Neossolo. Seus

limites estendem-se além do PESB, alcançando propriedades rurais adjacentes, onde também é valorizado por sua fertilidade.

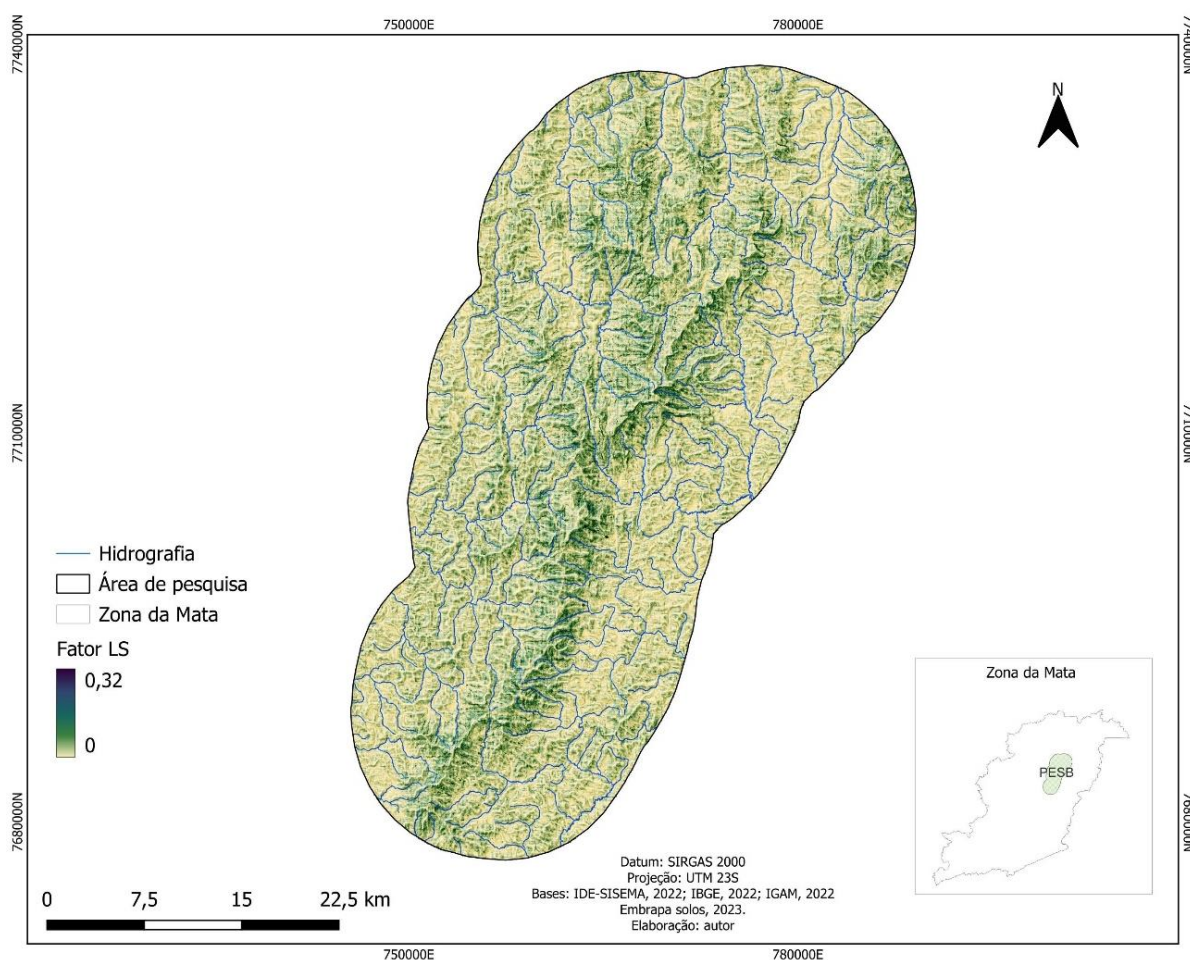
Por fim, a maior extensão da área de estudo é coberta pelo Latossolo Vermelho-Amarelo, que se destaca por sua estrutura e desenvolvimento avançado. Este solo possui uma alta estabilidade estrutural, baixa suscetibilidade à erosão e profundidade que favorece o desenvolvimento radicular, conferindo-lhe as menores taxas de erodibilidade entre os solos estudados. Predomina nas maiores parcelas das propriedades rurais da região, proporcionando uma base estável para a agricultura e outras atividades rurais.

Fator LS

O fator LS é um componente relevante no cálculo da erosão potencial do solo pela Equação Universal de Perda de Solo (Universal Soil Loss Equation, USLE) e seus modelos derivados, como a RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Esse fator é o produto de dois subfatores: o "L", que representa o comprimento do declive, e o "S", que quantifica a inclinação do declive. Essencialmente, o fator LS avalia como o comprimento e a inclinação do terreno influenciam a taxa de erosão do solo. Áreas com declives mais longos e mais íngremes tendem a ter valores maiores de LS, indicando maior potencial de erosão, pois a água flui por uma distância maior, ganhando mais energia e capacidade para transportar partículas do solo. O uso desse fator é fundamental para planejar medidas de conservação do solo, como a implementação de terraços e a orientação do plantio em contorno, para mitigar os efeitos da erosão.

Os maiores valores do fator LS são observados nas rampas alongadas e íngremes onde os Neossolos Litólicos e os Cambissolos Húmicos se encontram no interior do PESB (Figura 10). Esses valores também são significativos no norte da área de estudo, em regiões de planaltos formados por Latossolo Vermelho-Amarelo. Os efeitos erosivos do fator são, em certa medida, atenuados pela presença de formações naturais no PESB. Sem essa proteção natural, parte dos Neossolos e Cambissolos já teriam sido transportados para os corpos hídricos localizados a jusante. Notadamente, as áreas de menor fator LS são aquelas com menor inclinação, onde há maior presença de alterações dos usos da terra.

Figura 10: Fator LS da área de estudo



Fonte: Elaboração própria.

O peso desta variável na AHP foi de 0,09, o que atribuiu a quarta importância em relação a definição de áreas prioritárias. É importante destacar o rigor do fator LS, especialmente em vertentes expostas a ações climáticas, que poderiam resultar em impactos negativos significativos. Esse fator enfatiza a necessidade de considerar a estabilidade do solo e os riscos de erosão ao selecionar áreas para restauração.

Taxa de carbono no solo

O solo é o segundo maior reservatório de carbono do planeta, contendo aproximadamente 2.500 gigatoneladas de carbono (Zomer *et al*, 2017), o que supera a quantidade presente na atmosfera e na biomassa vegetal combinadas. Esse carbono está

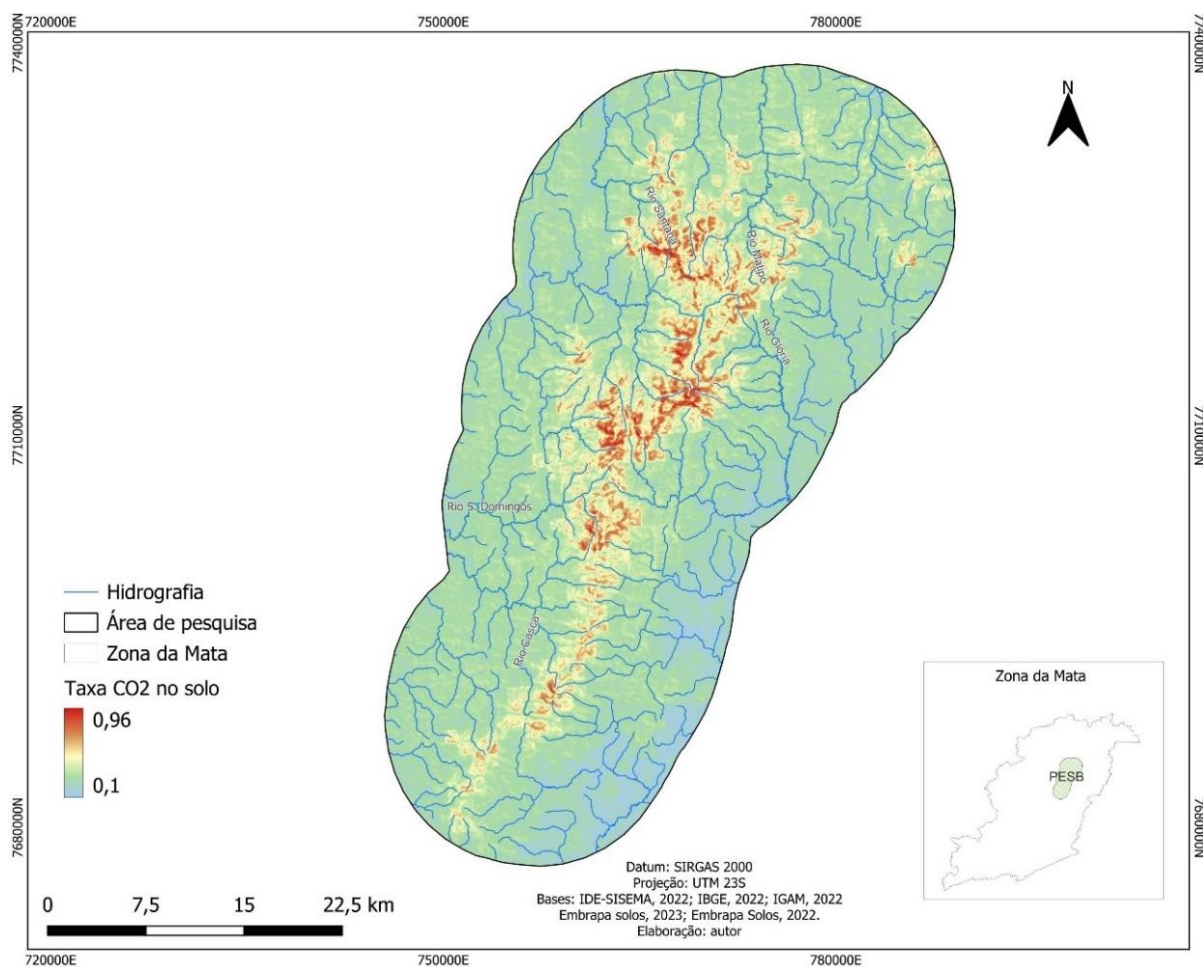
principalmente na forma de matéria orgânica do solo, que inclui restos de plantas e animais em diferentes estágios de decomposição.

O aprisionamento e sequestro de carbono, desempenham papel fundamental no controle dos níveis de CO₂. Quando o carbono é estabilizado no solo, ele se torna inativo. Além disso, solos ricos em carbono tendem a ser mais férteis e melhorar a produtividade agrícola, o que gera benefícios econômicos para as comunidades rurais.

A degradação desses solos, principalmente por drenagem e conversão agrícola, pode liberar grandes quantidades de carbono para a atmosfera, exacerbando o problema das mudanças climáticas. A proteção dessas áreas, portanto, é essencial para manter o equilíbrio entre o carbono terrestre e atmosférico.

A taxa acumulada de carbono no solo, em profundidades de 0 a 20 centímetros, foi obtida através de levantamentos realizados pela Embrapa Solos. Ademais, as áreas com florestas desenvolvidas, como o PESB, apresentaram os maiores quantitativos de carbono no solo, conforme ilustrado na Figura 11. Consequentemente, essas áreas tornaram-se reservatórios significativos de carbono, tanto no solo quanto na biomassa. Na AHP a variável taxa de carbono alcançou a quinta posição em termos de importância, com um peso de 0,04.

Figura 11: Taxa de carbono no solo



Fonte: Elaboração própria.

Na escala normalizada entre 0 e 1, o PESB registrou valores significativos de carbono no solo, variando entre 0,80 e 0,96. Estes valores reforçam argumentos apresentados anteriormente, que já indicavam a importância das UC para a manutenção da qualidade dos serviços ecossistêmicos locais, como a manutenção do carbono inativo nos solos. Promover restauração florestal possui alta relevância, para a composição de novas áreas de reserva de carbono e biodiversidade. Em mesma medida, a manutenção das florestas existentes ganha destaque, uma vez que existe uma dinâmica entre os elementos espaciais que promovem distintos serviços ecossistêmicos como o aprisionamento de carbono na biomassa e no solo.

4.2.3. Modelo de áreas prioritárias à restauração ativa

Após o processamento e adequação das variáveis com seus respectivos pesos, esses insumos foram submetidos à CLP. Como já exposto, a CLP é uma técnica matemática usada para combinar várias medidas ou observações, cada uma com um peso específico que reflete sua importância relativa. Essa abordagem é frequentemente utilizada em estatísticas, economia, e ciência de dados para criar índices ou para realizar análises multicritério, onde diferentes critérios têm diferentes níveis de significância, como as variáveis analisadas em questão.

Cada pixel das variáveis foi multiplicado pelo peso obtido na AHP e, em seguida, as variáveis com novos valores foram somadas entre si. A segunda etapa consistiu na remoção das áreas restritivas, tendo-se como resposta apenas as áreas propícias à restauração, classificadas por escala de importância. Esta ação é relevante em processos de recomposição, uma vez que a restauração demanda investimentos financeiros contínuos para o custeio de mudas, cercamento de áreas, como nascentes e manutenções periódica. Compreender as melhores áreas permite implementar ações mais direcionadas e eficazes.

Na pesquisa, ao analisar a base de déficit de APP e RL, disponibilizada pelo CSR (2023), identificou-se um déficit de 2.273 hectares. É importante destacar que a área adjacente ao PESB abrange 144.273 hectares, o que faz com que esse déficit represente cerca de 2% da área total do entorno da UC. O reduzido saldo devedor decorre principalmente de dois fatores: o CAR é declaratório, fato este que possibilita existir omissão da real condição das áreas protegidas em propriedades rurais. O segundo fator provém do expressivo número de pequenas propriedades rurais, abaixo de 4 módulos fiscais, que são isentas da obrigação de recompor determinadas áreas já degradadas anteriormente a 2008. Neste contexto, novas perspectivas, que descortinem os benefícios da restauração, para além dos aspectos do mero cumprimento da Lei, fazem-se necessárias.

Vale regatar que, no diagnóstico da paisagem, constatou-se uma predominância de pastagens subutilizadas para fins agropecuários, representando cerca de 42% da área em contraste com 29% de formações florestais, sendo o PESB responsável por uma parcela expressiva desse uso do solo.

Na Figura 12, visualizam-se os resultados da modelagem das áreas mais propícias para fins de restauração. As áreas foram classificadas, conforme a prioridade, em: muito alta (5.801 ha), alta (30.544 ha), moderada (58.896 ha), baixa (10.059 ha) e muito baixa (358 ha).

Após a conclusão do modelo, confirmou-se a necessidade de intervenções restaurativas nessas áreas. O modelo identificou um volume considerável de áreas prioritárias (classificadas como muito altas) dentro dos limites dessas zonas. Do montante dos 598 fragmentos, 63 estão na Zona A, 239 na Zona B e 83 na Zona C. Notavelmente, 64% de todas as áreas prioritárias identificadas pelo modelo situam-se no interior das zonas identificadas com escassez de manchas florestais. O tamanho médio das manchas das áreas estratégicas à restauração foi de 9,30 hectares e o máximo 240 hectares. Ressalva-se a presença de manchas pequenas que ocasionou o valor da mediana de 1,17 hectares.

Os municípios localizados nas zonas de maior fragilidade, como Jequeri, Araponga, Ervália, Muriaé, Miradouro, Fervedouro, Divino e Santa Margarida, possuem a agropecuária como uma das principais atividades econômicas, segundo dados do IBGE de 2022. A pecuária, voltada tanto para o corte quanto para a produção de leite, mostra-se preponderante em escala local. Quanto à agricultura, destacam-se Araponga, Ervália e Santa Margarida, principalmente no cultivo do café, enquanto a silvicultura apresenta maior expressividade em Araponga e Fervedouro.

Esses valores destacam a concentração das áreas prioritárias para restauração em comparação com as zonas identificadas como frágeis nas formações florestais. No entanto, para que o processo de restauração seja eficaz, é essencial que ele inclua todas as regiões da área de estudo, não apenas as mais deficitárias. Isso permitirá aprimorar a conectividade entre as florestas e a proteção dos corpos d'água.

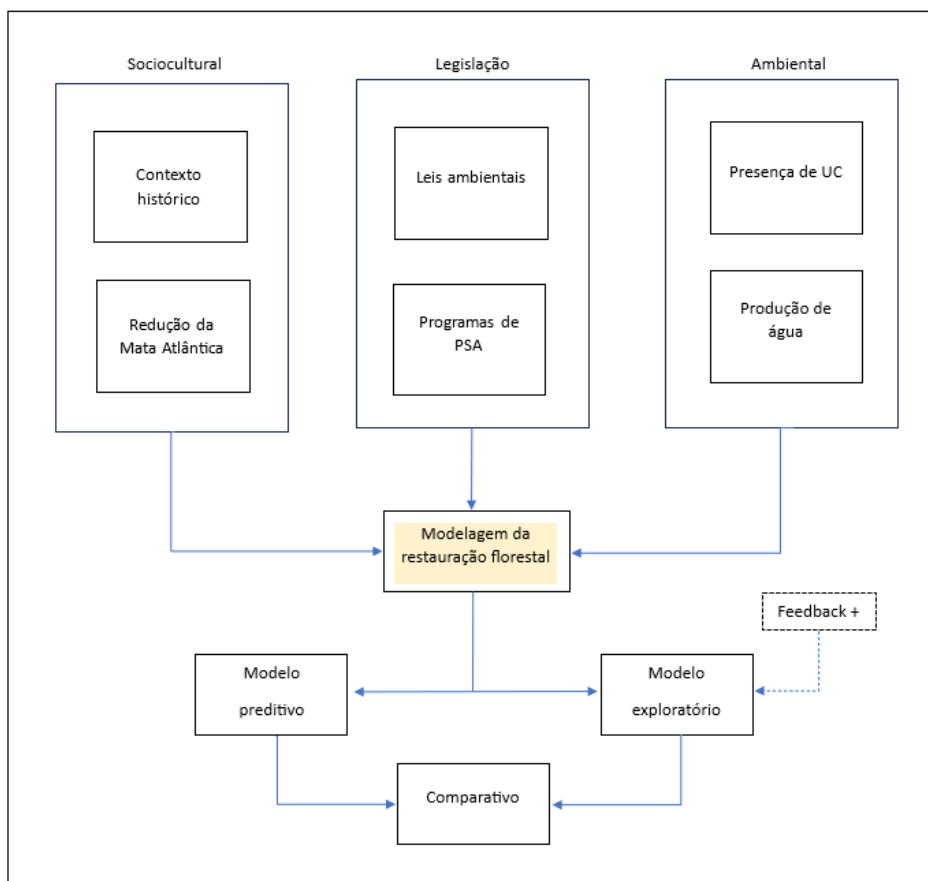
4.3. Resultados da modelagem dinâmica

Os resultados da modelagem foram transcritos e analisados conforme os métodos adotados na produção dos modelos. Esse processo foi iniciado com o modelo conceitual (Figura 13), que delineou os contextos socioeconômicos, ambientais e legislativos, bem como as proposições esperadas pelos modelos.

Modelos conceituais na modelagem de Mudanças no Uso e Cobertura da Terra (LUCC) são importantes para a compreensão e previsão de alterações na paisagem. Esses modelos integraram visualmente variáveis socioeconômicas, políticas e ambientais para criar um quadro abrangente das dinâmicas de uso da terra. Além disso, a inclusão de legislações específicas e

propositivas que conduzam a mudanças, como a restauração florestal por meio de PSA, permitem análises de cenários futuros sob diferentes óticas.

Figura 13: Modelo conceitual



Fonte: Elaboração própria.

A compreensão do contexto da área de estudo permite checar as respostas obtidas nos processos da modelagem, de maneira a validar ou excluir aquelas que demonstrem dados enviesados ou estatísticas incoerentes. Historicamente a área de estudo, anterior ao primeiro ano de análise (1985) já se encontrava com elevada substituição das formações florestais por outros usos, sobretudo pela pastagem. Logo, faz-se necessária atenção quanto a herança do deflorestamento na região. Em mesma medida, deve-se ater também aos atos que promoveram a restauração, mesmo que em menor escala, como leis e incentivos e conscientização do produtor rural, como programas de PSA. Tornou-se relevante ao contexto ambiental local a

presença do PESB, que expôs considerável regeneração florestal desde sua criação. Além disso, abriga distintas nascentes que compõem as bacias do rio Doce e Paraíba do Sul.

Para os modelos, *rasters* de uso da terra utilizados coincidem com os anos empregados na modelagem determinística, sendo os anos de referência 1985, 2005 e 2022. Para a fase de calibração, foram utilizados os dados de uso da terra dos anos 1985 e 2005, enquanto na fase de validação, os anos de 2005 e 2022 foram considerados. Já na projeção, fez-se uso do *raster* do ano de 2022.

As diferentes classes de uso da terra foram reclassificadas para visualizar as mudanças provocadas pela restauração florestal e desflorestamento. Nesse contexto, as classes agrupadas resultaram em: (1) Floresta, (2) Pastagem e mosaico de uso, (3) Agricultura perene, intermitente, café e silvicultura, e (4) Urbano e mineração. As mudanças transacionais do uso da terra para restauração florestal foram modeladas prioritariamente para as classes de pastagem e mosaico de uso. Essa escolha se deve ao subaproveitamento das pastagens para fins pecuários e ao fato de ainda serem a classe em maior proporção na paisagem. O mosaico de uso também apresenta uma proporção considerável na paisagem, mas com baixo uso agrícola, sendo frequentemente ocupado por cultivos sazonais ou pastagem. Ambas as classes são consideradas as mais propícias para a alocação de novas manchas florestais, minimizando conflitos quanto aos usos da terra.

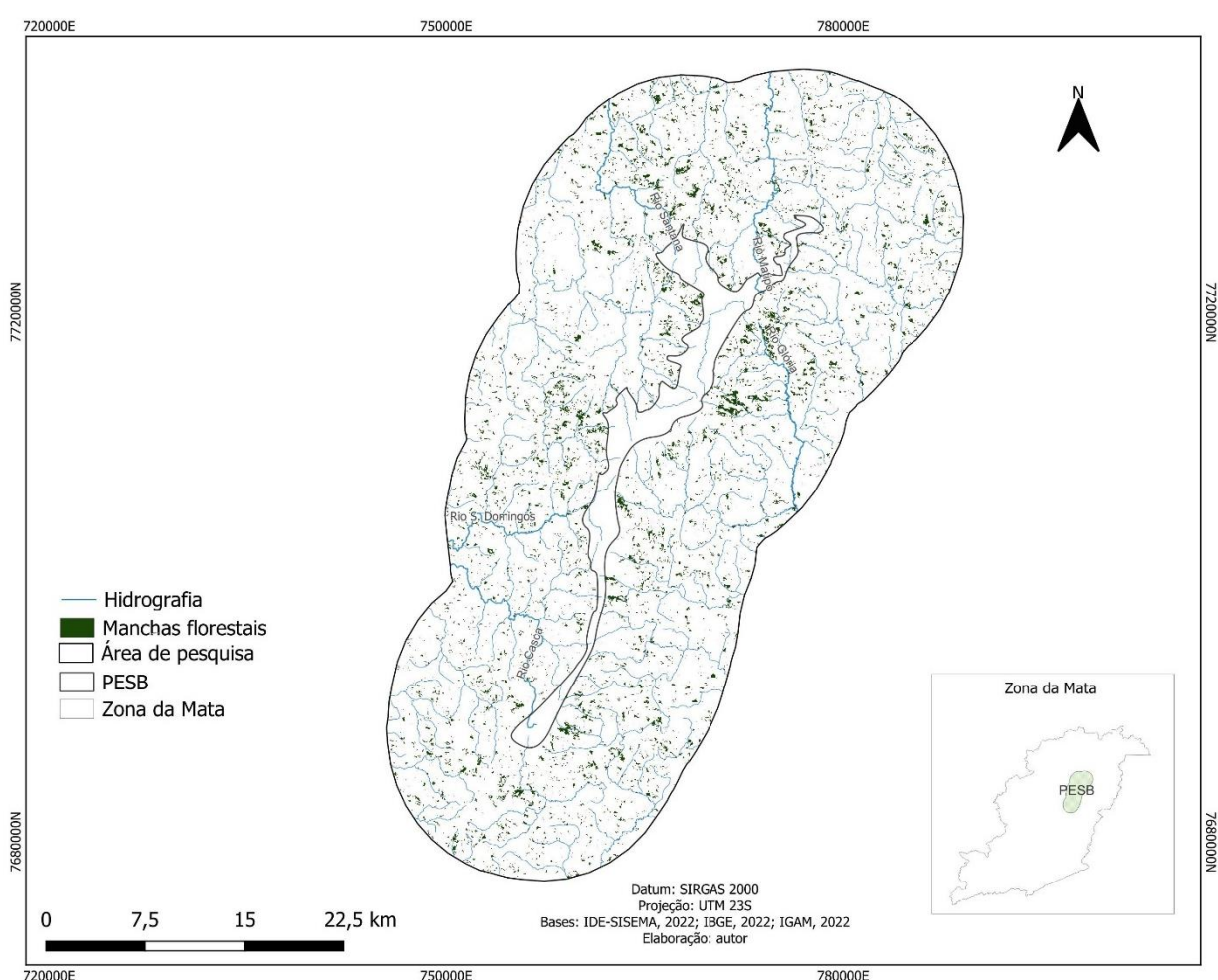
4.3.1. Matriz de transição

Na formulação da matriz de transição, utilizaram-se os *rasters* reclassificados de 1985 e 2005. A matriz de transição calcula a mudança entre as classes de uso da terra, permitindo uma análise das dinâmicas espaciais e temporais entre os períodos. Os resultados obtidos no Dinâmica são armazenados em duas tabelas distintas: a *multi_step*, que contém as taxas de transições anuais, e a *single_step*, que contém as taxas para o período completo.

No que diz respeito às perdas florestais, a maior transição registrada no período de 20 anos foi para pastagem e mosaico de uso (2), contabilizando 21,47%. Em seguida, a segunda maior diminuição de áreas naturais ocorreu em direção à agricultura (1,52%), composta por cultivos perenes, temporários, café e silvicultura. Apesar das comprovadas perdas florestais, ocorreram também transições para áreas de floresta. A transição de pastagem para floresta

apresentou uma taxa de 5,54%, enquanto a transição da agricultura para floresta teve uma taxa de 10,12%. Essas taxas são de interesse para o processo de modelagem, pois indicam os quantitativos no espaço e no tempo das conversões florestais. A matriz de transição é uma peça fundamental nas fases seguintes da modelagem, pois serve como um insumo para calibrar e validar o modelo. Na Figura 14, visualiza-se a distribuição de manchas florestais, surgidas principalmente em propriedades rurais entre 1985 e 2005.

Figura 14: Transição de outros usos para floresta de 1985 a 2005



Fonte: Elaboração própria.

As manchas florestais demonstradas na Figura 14 possuem uma área média de 0,80 hectares e mediana de 0,17 hectares que demonstra a massiva presença de manchas pequenas. Apenas 41 manchas ultrapassaram o tamanho de 10 hectares, estas sobretudo estão localizadas

adjacentes aos limites do PESB, o que evidencia a influência da UC no processo de reconstituição florestal. A somatória dos usos convertidos à floresta nas duas décadas foi de 6.226 hectares, que representa 3,9% da área de estudo. Já a área convertida de floresta para outros usos foi de 8.828 hectares que correspondem a 5,5% da área de estudo, provocando um déficit de 2.602 hectares de floresta.

4.3.2. Calibração

A calibração visa avaliar o quanto cada elemento de um modelo contribui para a surgência ou intensificação de um fenômeno, neste caso específico, o processo de restauração florestal. Como demonstrado acima, apesar da conversão de florestas para outros usos ter ocorrido em maior volume, também ocorreram conversões para floresta. O surgimento de novas manchas florestais pode ser intensificado pela proximidade de certos elementos espaciais, como manchas florestais existentes, ou inibido por outros, como a proximidade de estradas.

Para entender tais dinâmicas, a primeira etapa da calibração é obter os pesos de evidências das variáveis. Os pesos de evidência são parâmetros quantitativos usados na modelagem de sistemas ambientais, que indicam a influência positiva ou negativa de fatores específicos na ocorrência de um fenômeno. Pesos positivos (W^+) indicam uma correlação positiva, ou seja, a presença do fator aumenta a probabilidade do evento ocorrer. Já os pesos negativos (W^-) indicam uma correlação negativa, onde a presença do fator reduz a probabilidade do evento.

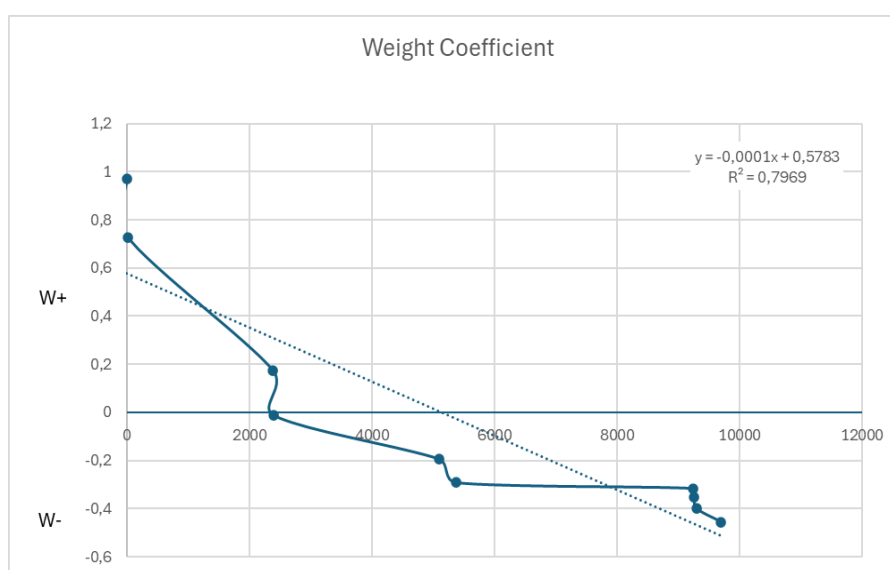
Para a obtenção dos pesos de evidência, as variáveis foram submetidas aos containers *Determine Weights of Evidence Ranges* e *Determine Weights of Evidence Coefficients*. O primeiro categoriza variáveis contínuas e cria intervalos de incrementos a serem adotados quando a variável é observada na paisagem. Todas as variáveis foram contínuas, sendo elas: i) distância da unidade de conservação; ii) distância de áreas florestais; iii) declividade do terreno; iv) proximidade a corpos hídricos; e v) distância das rodovias.

Após diversos testes de incrementos, foi determinado que o melhor valor incremental para a maioria das variáveis foi 20 metros. Para a variável declividade, devido ao fato de estar em porcentagem, o melhor valor de incremento foi 5 por cento. Após o processamento em ambos containers, foi possível obter o peso de cada variável, apresentados abaixo:

Distância à unidade de conservação

A distribuição dos pesos em relação ao incremento espacial se mostrou pertinente. A variável apresentou um comportamento positivo para a formação de manchas florestais próximas ao PESB até uma distância de 2.400 metros. Após essa distância, expressou pesos negativos no tocante à composição de novas manchas (Gráfico 2). A variável demonstrou boa aderência à explicação da restauração florestal, apresentando um R^2 de 0,80.

Gráfico 2: Peso de evidência distância da UC



Fonte: Elaboração própria.

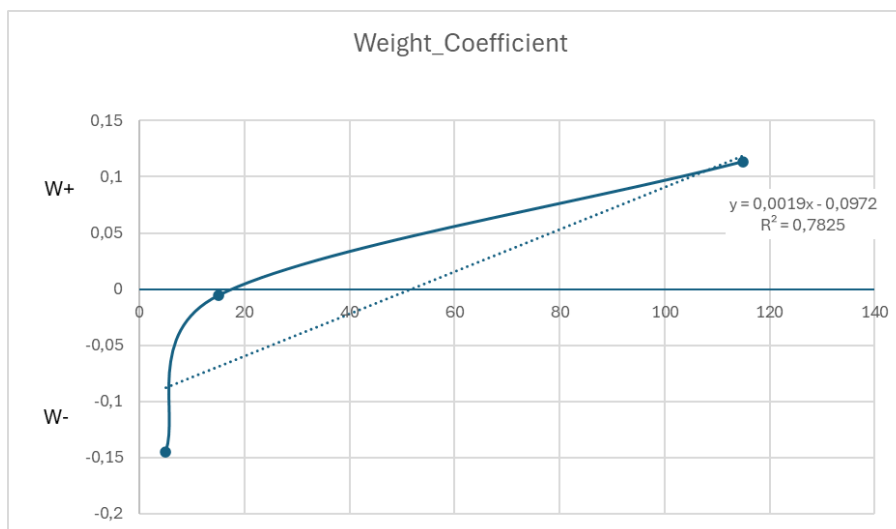
Declividade

A declividade da área de estudo foi convertida para porcentagem antes das fases da modelagem, em conformidade com os valores estabelecidos pela Embrapa (1999). Observou-se que as faixas de declividade plana, suave ondulada e ondulada dificultam a restauração florestal na área de estudo, pois essas áreas foram predominantemente destinadas a fins agropecuários antes mesmo do primeiro ano pesquisado (1985). Logo, nas fases da modelagem, foi identificado esse padrão de ocupação das margens dos corpos hídricos por outros usos distintos da floresta. Por outro lado, as classes de declividade acima de 20% de inclinação (forte ondulada e montanhosa) possuem um impacto positivo na formação florestal (

Gráfico 3). Pois, essas classes requerem maior investimento para a implantação de estruturas e maquinários, o que reduz sua atratividade para fins agropecuários e urbanos, em

comparação com as primeiras. A variável explica 78% da restauração florestal, conforme demonstrado no gráfico.

Gráfico 3: Peso de evidência da declividade



Fonte: Elaboração própria.

Drenagem

A drenagem representa todos os corpos hídricos em distintas ordens hierárquicas na área de estudo. Essa variável possui alta correlação com a restauração florestal, demonstrando um R^2 de 0,94. Todavia, as áreas adjacentes aos corpos hídricos até 140 metros apresentaram peso negativo, o que dificulta a restauração florestal dessas áreas. Os pesos tornam-se positivos após os 140 metros, o que demonstra parte das estratégias, em propriedades rurais, de composição ou manutenção de reservas legais em áreas mais afastadas das fontes hídricas.

Gráfico 4: Peso de evidência distância da drenagem



Fonte: Elaboração própria.

O cenário adequado, especialmente para áreas diretamente conectadas a rios, ribeirões e córregos, seria com pesos positivos para a recomposição ripária. Contudo, vale lembrar que as propriedades no entorno do PESB, em sua maioria, são classificadas como pequenas propriedades, desobrigadas da restauração de determinadas áreas de RL desmatadas antes de 2008. A conversão dessas áreas para outros usos já havia ocorrido antes do primeiro ano considerado na pesquisa (1985), logo, o modelo constatou que áreas próximas a corpos d'água repelem a restauração florestal. Esse fato reforça a importância do modelo anterior (AHP-CLP), que definiu as áreas estratégicas prioritárias para restauração ativa, que teve como referência a proteção dos corpos hídricos e o aumento de biomassa. Diante do caso apresentado, destaca-se a necessidade de, juntamente com os números obtidos em modelos, ter-se um esforço para se compreender também a dinâmica social, econômica e política atuante na área estudada, para obter análises mais precisas.

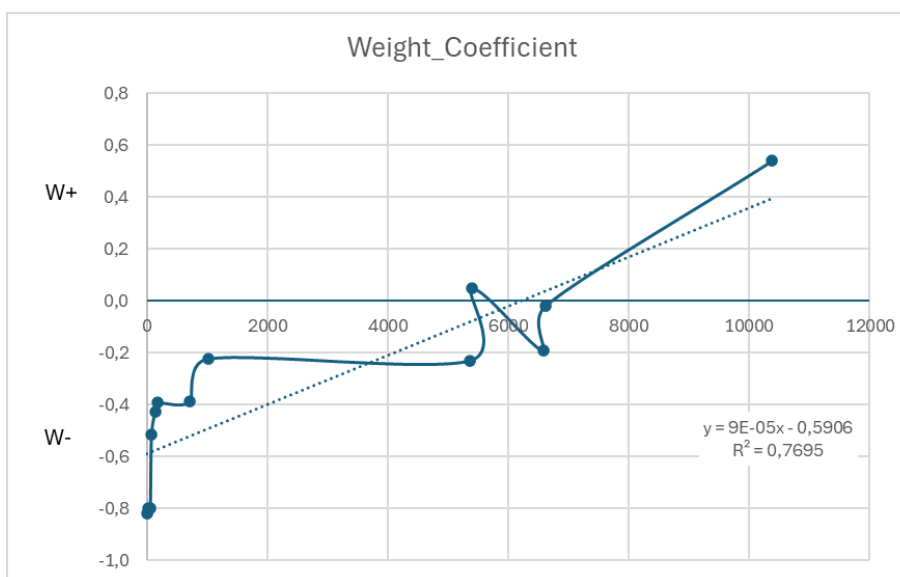
Distância as estradas

As estradas, conforme demonstrado em diversos estudos sobre o desmatamento, são variáveis que promovem esse fenômeno (Soares-Filho *et al.*, 2004; Soares-Filho *et al.*, 2006; Soares-Filho *et al.*, 2010). Na modelagem para a restauração florestal na área de estudo, elas se comportaram de maneira inversa. As estradas possuem efeito negativo sobre a restauração

florestal até uma distância de 6.620 metros, fato explicado pela expansão de novos usos que substituem as formações florestais ocorrendo através das estradas (

Gráfico 5).

Gráfico 5: Peso de evidência distância das estradas

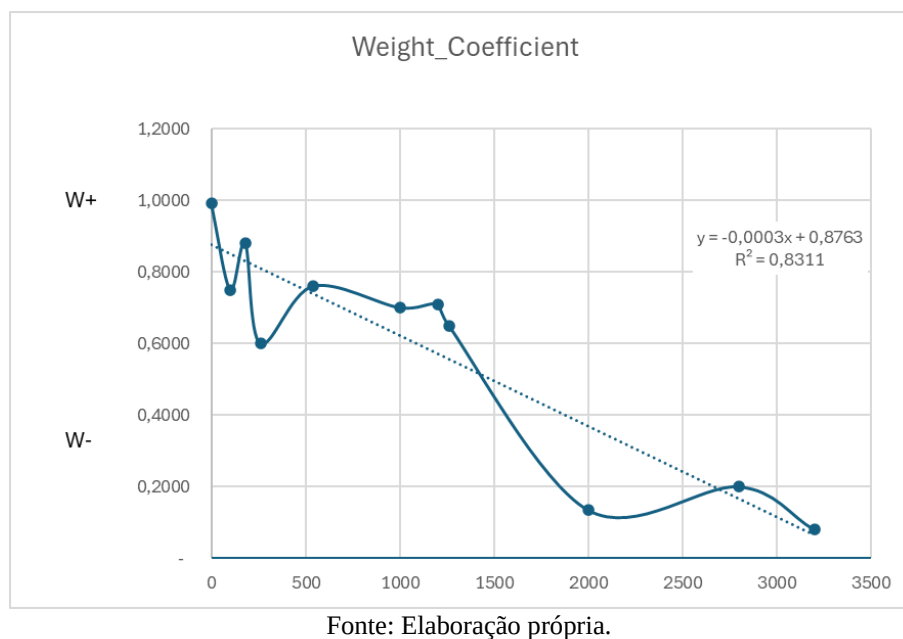


Fonte: Elaboração própria.

Distância a manchas florestais

As manchas florestais são áreas de cobertura vegetal presentes em propriedades rurais no entorno do PESB, incluindo APP, RL e outras formas de manutenção de coberturas florestais. Essas manchas mostraram uma responsividade significativa à restauração florestal, com um R^2 de 0,83 associado a um peso positivo, indicando maiores valores em áreas próximas às manchas florestais existentes (Gráfico 6).

Gráfico 6: Peso de evidência de manchas florestais



Correlação entre as variáveis

A análise de correlação espacial entre variáveis é um passo fundamental para entender as relações espaciais e a influência mútua entre diferentes fatores em estudos de modelagem ambiental. No presente estudo, aplicou-se o teste de Cramer para avaliar a correlação entre os pares de variáveis. Os resultados indicaram que todas as correlações apresentaram valores abaixo de 0,5, sugerindo uma baixa correlação entre as variáveis testadas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Esse resultado é significativo pois indica que não há redundância considerável entre as variáveis, permitindo que todas sejam mantidas na modelagem sem risco de multicolinearidade. A manutenção de todas as variáveis no modelo assegura uma análise mais abrangente e detalhada, capturando as nuances das interações espaciais no ambiente estudado.

Tabela 6: Teste de Cramer

First_Variable	Second_Variable	Cramer
Dist. UC	Declividade	0,05
Dist. UC	Dist. Drenagem	0,03
Dist. UC	Dist. Estradas	0,1
Dist. UC	Dist. Manchas florestais	0,17
Dist. UC	Distance_to_1	0,06
Declividade	Dist. Drenagem	0,07
Declividade	Dist. Estradas	0,02
Declividade	Dist. Manchas florestais	0,07
Declividade	Distance_to_1	0,07
Dist. Drenagem	Dist. Estradas	0,04
Dist. Drenagem	Dist. Manchas florestais	0,09
Dist. Drenagem	Distance_to_1	0,09
Dist. Estradas	Dist. Manchas florestais	0,06
Dist. Estradas	Distance_to_1	0,04
Dist. Manchas florestais	Distance_to_1	0,42

Fonte: Elaboração própria.

A correlação por Cramer foi aplicado inclusive em relação a variável dinâmica dos modelos, denominada “Distance_to_1”. A variável dinâmica conhecida como "Distance_to_" na modelagem do Dinâmica EGO é uma variável espacial que mede a distância de cada célula de um mapa a uma característica específica, como estradas, rios, áreas desmatadas, entre outros. Essa variável é recalculada a cada passo de tempo do modelo, refletindo as mudanças no cenário espacial à medida que o modelo evolui.

4.3.3. Validação

Após a calibração dos modelos, o passo seguinte é a validação, essencial na modelagem espacialmente explícita. No contexto do software Dinâmica EGO, a validação envolve a utilização de funtores e containers, que permitem a geração de mapas simulados e mapas de probabilidade.

O processo de validação no Dinâmica EGO começa com a criação de mapas simulados, que representam as previsões do modelo para a distribuição espacial dos usos da terra. Esses mapas são gerados com base em dados de entrada dos anos de 2005 e 2022. Simultaneamente,

são criados mapas de probabilidade que indicam a probabilidade de transição de diferentes classes de uso da terra em cada local.

Para obter os mapas simulados e os mapas de probabilidades, utilizou-se como inputs a matriz de transição, o mapa inicial de uso da terra (2005) e os pesos de evidências. Com o objetivo de produzir os mapas simulados e probabilísticos até o ano de 2022, inseriu-se nos modelos uma estrutura de repetição "For" com 17 interações anuais. Dentro dessa estrutura de repetição, foram utilizados os seguintes funtores:

Transition rates: este functor calcula a taxa de transição em cada interação, com base na matriz de transição.

Mux categorical map: recebe as mudanças dos usos da terra em cada interação, permitindo a atualização contínua.

Updated Landscape (Patcher): possibilita o surgimento de novas manchas florestais, controladas pelas regras dos autômatos celulares, tamanho médio das manchas, variância e isometria.

Na função "Patcher" do Dinamica EGO, a isometria refere-se a um processo que mantém a forma original das áreas ou patches ao longo da simulação. O valor do tamanho médio das manchas florestais foi de 0,80, a variância de 4 e a isometria de 1.

Após a obtenção de mapas simulados e mapas de probabilidades, efetuou-se a validação propriamente dita. O functor "Calc Multi window Similarity of Differences" é particularmente útil nesta etapa. Ele compara a similaridade entre mapas observados e simulados usando uma abordagem de janelas móveis, calculando métricas de similaridade para diferentes janelas de análise. A janela de decaimento 11x11 é uma matriz de 11 por 11 células (pixels) que se desloca ao longo do mapa, avaliando a similaridade em cada posição. O termo "decaimento" indica que o peso dado às células dentro da janela diminui à medida que se afastam do centro da janela. Isso é feito para dar maior importância às correspondências espaciais próximas ao ponto central da janela, refletindo uma proximidade espacial mais relevante. Logo, um pixel simulado que não esteja exatamente sobre seu correspondente observado terá um valor de validação reduzido, proporcional à distância do pixel central. O resultado obtido pela janela deslizante 11x11 foi

uma similaridade de 76%. Em outras palavras, o modelo atingiu essa porcentagem de correspondência em um quadro espacial composto por 121 células (11x11). Trabalhos científicos que fazem uso da modelagem como ferramenta no auxílio das análises, demonstram que o valor é considerado aceitável para esse tipo de análise (Soares-Filho *et al.*, 2006).

4.3.4. Projeções da modelagem: cenários preditivo e exploratório para a restauração

Nesta fase da modelagem, foram projetados até o ano de 2050 os possíveis cenários de expansão das manchas florestais. O primeiro cenário predito trouxe valores condizentes com as tendências atuais. É importante observar que na área de estudo, diversas ações objetivadas a manter fragmentos florestais e recuperar áreas com espécies da Mata atlântica já são promovidas por distintos órgãos, como: SOS Mata Atlântica, Portal da Mantiqueira, TNC Mata Atlântica dentre outros. O resultado das ações dos atores durante os anos foi convertido no aumento de áreas com o bioma entre os anos de 2005 e 2022.

Vale destacar que entre os anos de 1985 e 2005, a redução florestal era imperante, sobretudo para pastagem. Por vez, no modelo preditivo, esta nova tendência de recuperação também foi mantida, o que demonstra, mesmo no cenário tendencial, paisagens compostas por maior presença de florestas no futuro, caso sejam mantidas políticas de restauração.

No cenário exploratório, as áreas estratégicas para restauração foram inseridas como novo *input* no modelo. Essas áreas estratégicas, obtidas pela modelagem determinística, priorizaram os corpos hídricos e as manchas florestais existentes. Para a inserção da nova variável, fez-se necessário repetir as fases construtivas do modelo, passando-se pela calibração, validação e projeção. Como as áreas prioritárias são proposições, as mesmas em sua essência, possuíam valor nulo quanto a influência a restauração florestal. Assim, na etapa de pesos de evidências, à mesma foi atribuído peso positivo de 0,5 para a transição de usos da terra à floresta. Após sua inserção como variável positiva à restauração florestal, checkou-se a correlação espacial entre o conjunto de variáveis, obtendo-se valores abaixo de 0,5 que justificou a manutenção de todos *inputs* no modelo.

Destaca-se a importância das variável com as áreas prioritárias para restauração ativa, uma vez que, no processo de construção dos modelos probabilísticos, as variáveis

“Declividade” e “Drenagem” apresentaram pesos negativos para a restauração florestal próximo à rede hidrográfica, já que essas áreas foram historicamente ocupadas por outros usos. Assim, a inclusão das áreas estratégicas possibilitou a correção necessária, permitindo o ajuste espacial, com maior precisão do modelo a propósitos ambientais. Para uma proposta que possibilite maior equilíbrio socioambiental, não basta apenas o aumento de áreas restauradas, mas sim que estas sejam em localidades adequadas para o recrudescimento dos serviços ecossistêmicos, sem conflitos com os usos econômicos atuais da terra.

Os modelos preditivo e exploratório foram projetados em passos anuais. A partir de 2022, o ano final do uso da terra observado, foram projetados 28 passos até 2050. Na projeção, além da função *Patcher*, que cria novas manchas, utilizou-se o *Expander*, responsável pela expansão das manchas existentes. A importância atribuída à formação de novas manchas foi de 30% e para expansão das manchas existentes 70%. A aplicação conjunta de ambas as ferramentas foi possível com o uso do functor *Allocate Transition*. No functor, os valores de média, variância e isometria foram preenchidos com os mesmos valores das métricas da paisagem utilizadas na fase de simulação na validação, sendo respectivamente 0,8; 4 e 1. A similaridade do modelo para a janela deslizante de 11x11 pixels foi de 76%, tanto para o modelo preditivo quanto para o exploratório.

4.3.4.1. Resultados e análises numéricas dos modelos

Após o processamento dos modelos, os anos de 2030, 2040 e 2050 foram projetados na Tabela 7. Objetivou-se um comparativo numérico e uma interpretação dos valores, expondo as consequências para a paisagem em cada cenário. Destaca-se que os valores obtidos nas projeções de florestas são referentes às áreas no entorno do PESB.

Tabela 7: Comparativo de cenários

Métricas	Preditivo 2030	Exploratório 2030	Preditivo 2040	Exploratório 2040	Preditivo 2050	Exploratório 2050
Área	41.734,61	47.190,27	43.125,00	49.776,42	43.319,00	52.283,10
Média	3,26	3,48	3,21	3,42	3,57	4,98
Mediana	0,33	0,36	0,30	0,33	0,39	1,00
Mínimo	0,08	0,09	0,05	0,09	0,05	0,32
Máximo	2.987,00	3.209,54	3.361,00	3.334,72	3.387,00	3.456,70
Fragmentos	6.177	7.018	7.342	7.750	8.782	5.473

Fonte: Elaboração própria.

Para os cenários projetados para 2030 (Tabela 7), o modelo exploratório indicou um aumento de 5.455 hectares em comparação ao cenário tendencial para o mesmo ano. As análises focaram nos territórios adjacentes ao PESB; portanto, a área de 6.880 hectares de floresta dentro da UC não foi incluída nas métricas espaciais. Por exemplo, em caso de inclusão das manchas de floresta localizadas no PESB, elevaria a média de área por mancha em 2022 para 13,4 hectares, ressaltando que as manchas mais extensas estão no interior do parque. Para os cenários no entorno do PESB, as médias de área por mancha foram de 3,26 e 3,48 hectares para 2030, respectivamente.

A mediana para ambos os modelos se manteve abaixo de 0,5 hectare, evidenciando o surgimento de pequenas manchas florestais, uma observação corroborada pelo número de fragmentos identificados. As manchas de tamanho mínimo permaneceram inferiores a 0,1 hectares em ambos os modelos. A maior mancha foi registrada a leste do PESB, em áreas diretamente conectadas à UC, nos municípios de Fervedouro e Miradouro. Essas regiões, influenciadas pelo PESB, beneficiam-se da dispersão de sementes, das condições de microclima e da movimentação da fauna, fatores que favorecem a regeneração florestal. Adicionalmente, a reduzida presença de atividades antrópicas contribui para a conservação ambiental dessas áreas. Um dos aspectos que desestimula o uso da terra para fins agrícolas ou pecuários é o relevo acidentado, caracterizado por encostas íngremes, que impõe limitações a tais atividades.

Os cenários projetados para o ano de 2040 (Tabela 7) mostraram a continuidade do aumento florestal. O modelo exploratório apresentou um crescimento de 6.651 hectares de áreas florestais para além do previsto pelo modelo tendencial. Esse crescimento é significativo, pois indica uma tendência positiva na recuperação de áreas degradadas e na formação de novas áreas florestais. Entre as métricas, destaca-se o aumento do número de fragmentos, causado pelo surgimento de novas manchas entre as áreas florestais existentes e corpos d'água. Essas novas manchas possuem áreas reduzidas, resultando na queda das médias e medianas em ambos os modelos quando comparados ao ano de 2030.

Cabe destacar que a área representada pelo pixel de 30x30 metros é de 0,09 hectares, portanto, manchas florestais menores do que essa área, apesar de presentes no modelo, não são visualizadas. O aumento de novos fragmentos é benéfico para a biodiversidade local, pois contribui para a formação de novos corredores ecológicos que facilitam o movimento e a

dispersão de espécies. Além disso, com o passar dos anos, esses fragmentos podem expandir suas áreas.

É relevante observar o comportamento numérico dos modelos nos dois primeiros cenários analisados. Em 2030, houve uma maior expansão das manchas florestais existentes, enquanto em 2040, observou-se um aumento mais significativo na formação de novas manchas.

Para o ano de 2050 (Tabela 7), a expansão total das áreas florestais continuou. Contudo, o modelo preditivo indicou um incremento baixo em comparação a 2040, com um acréscimo de 194 hectares. No modelo exploratório, o aumento da restauração florestal foi mais acentuada, registrando um crescimento de 2.506 hectares em relação a 2040. Apesar do aumento na média e na mediana no modelo preditivo (3,57 ha; 0,39 ha), esses valores foram ainda mais expressivos no modelo exploratório (4,98 ha; 1,00 ha), reiterando a possibilidade de maior conectividade e apropriação de serviços ecossistêmicos na paisagem. A maior mancha (localizada a leste do PESB) em ambos os cenários expandiu no sentido norte/sul, uma vez que, a leste, atingiram o limite de expansão em 2040, controlado pelos usos restritivos da terra.

4.3.4.2. Resultados e análises espaciais dos modelos

A restauração passiva, caracterizada pela expansão e pelo aumento de novas manchas de Mata Atlântica, ocorrerá de forma progressiva ao longo dos anos de projeção. Esse processo se dará em pequenos avanços na paisagem, em uma transição contínua, desde que os condicionantes socioambientais, econômicos e de gestão parametrizados nos modelos sejam mantidos. Os pequenos avanços anuais da restauração refletem o padrão das manchas florestais existentes nas propriedades rurais ao redor do PESB. Conforme demonstrado na pesquisa, essas propriedades rurais possuem, em sua maioria, pequenos fragmentos de Mata Atlântica, com um tamanho médio menor que 1hectare.

Devido a esses pequenos avanços anuais, a visualização do progresso da restauração pode se tornar imperceptível de um ano para o outro. Para permitir uma visualização mais clara da expansão da Mata Atlântica ao redor do PESB, foi selecionado um recorte de aproximadamente 2.500 hectares, localizado no município de Pedra Bonita, ao norte do PESB. Esse recorte é delimitado pelas coordenadas (20°29'3.04"S, 42°22'50.81"O) e (20°31'50.11"S, 42°19'15.08"O), conforme demonstrado na Figura 15.

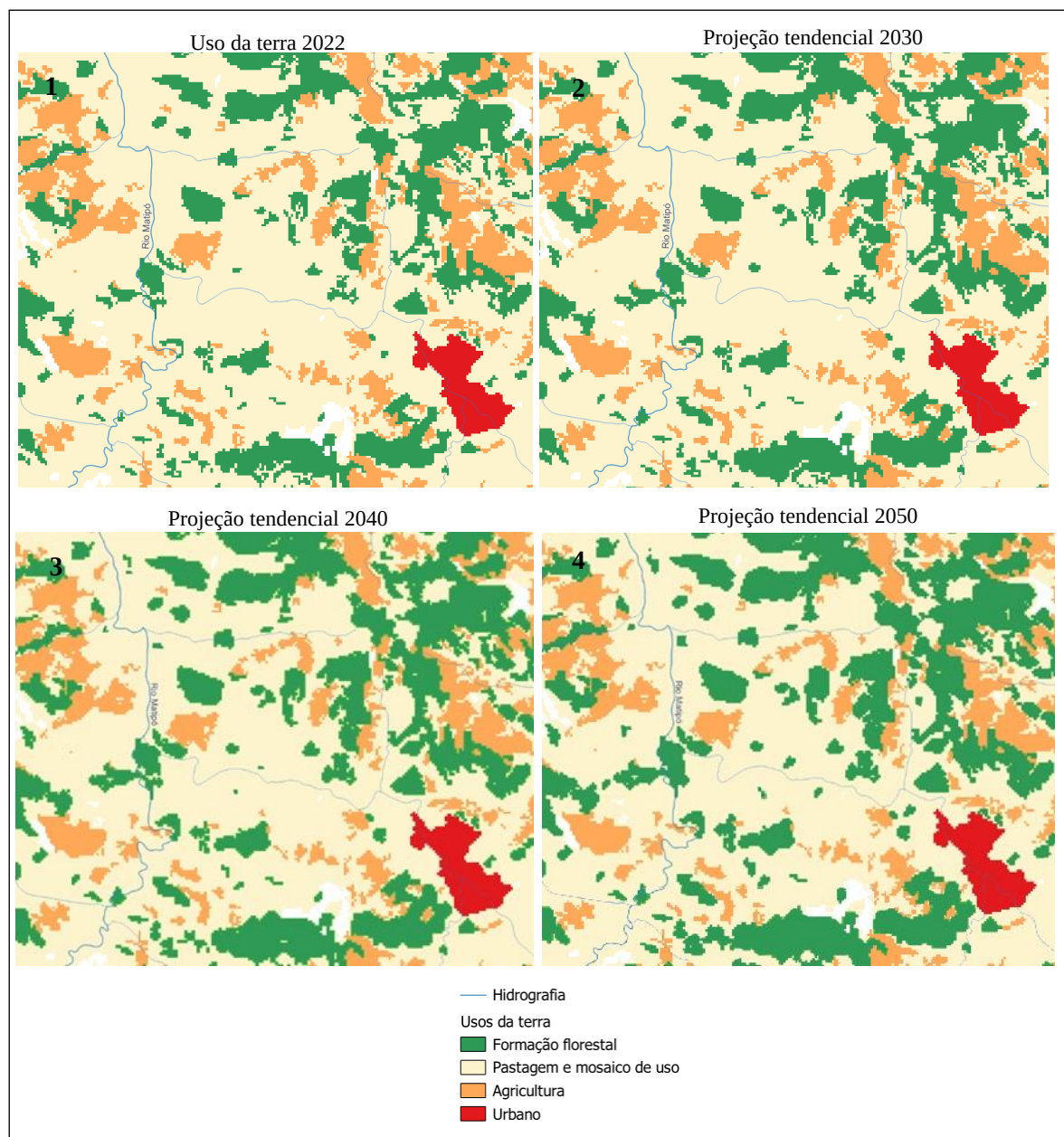
Figura 15: Localização da área ampliada para visualização em detalhes das restaurações



Fonte: Elaboração própria.

Para uma visualização espacialmente explícita das mudanças propostas nos modelos, foram definidas cenas temporais para o recorte espacial identificado na Figura 15, sendo: cena 1, cena 2, cena 3 e cena 4. A Figura 16 apresenta o uso da terra em 2022 (cena 1) e suas respectivas projeções tendenciais (preditivas) para 2030 (cena 2), 2040 (cena 3) e 2050 (cena 4).

Figura 16: Cenários tendências de recorte da área de estudo



Fonte: Elaboração própria.

A sede municipal do município de Pedra Bonita está situada a sudeste na cena, sendo um ponto de referência para a compreensão da distribuição espacial das atividades econômicas e do uso da terra na região. A rede hidrográfica é representada pelo rio Matipó e seus afluentes, alguns dos quais possuem nascentes no interior do PESB. Estes cursos d'água desempenham um papel relevante com a disponibilidade de água para as atividades agrícolas e pecuárias nas áreas adjacentes, bem como abastecimento humano.

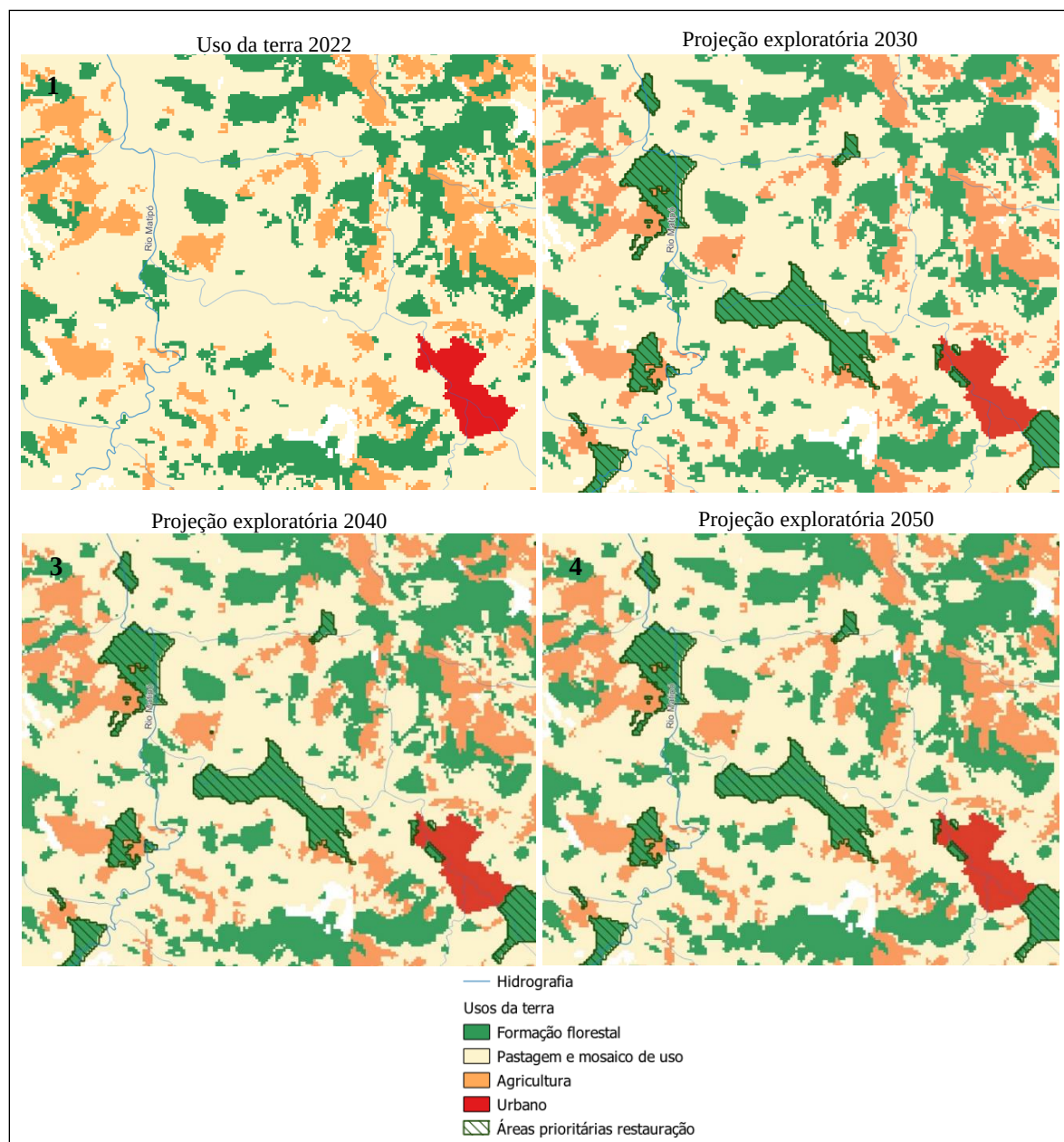
A cena 1 demonstra um uso da terra predominantemente composto por pastagens, especialmente nas propriedades rurais próximas aos rios e córregos na área central do recorte. Este padrão de uso da terra é característico de toda a área de estudo, refletindo uma prática antiga de uso da terra, apesar da produção pecuária ser em escala local.

Nas projeções, observa-se uma tendência de mudança significativa no uso da terra. Em 2030 (cena 2), a pastagem continua preponderante, mas se registra um aumento gradual das áreas florestais por expansão de manchas existentes. Esta tendência é acrescentada em 2040 (cena 3), onde as manchas florestais são aumentadas tanto por expansão dos fragmentos existentes quanto pelo surgimento de novos fragmentos.

Para 2050 (cena 4), o modelo preditivo indica uma expansão continuada das áreas de com Mata Atlântica, embora em menor intensidade comparada ao período anterior. Os novos fragmentos surgidos em 2040 tiveram uma ampliação de suas áreas, o que melhora a conexão florestal com a formação de corredores ecológicos.

Na modelagem exploratória, considerada com a inserção de áreas estratégicas para restauração como um *feedback* positivo ao fenômeno, foi representada na Figura 17. Utilizou-se o mesmo retângulo envolvente que compôs as cenas no modelo preditivo, localizado no município de Pedra Bonita.

Figura 17: Cenários exploratórios de recorte da área de estudo



Fonte: Elaboração própria

No cenário exploratório, a inserção das áreas estratégicas para restauração, na cena 2 do ano de 2030 proporcionou uma melhor distribuição das manchas florestais na paisagem, ocupando a área central próximo aos corpos d'água. As manchas de restauração ativa não sofreram expansão nos cenários, pois foram consideradas uma variável para o modelo exploratório e não um uso da terra propriamente dito. Dessa forma, possuem um peso positivo que influencia a mudança de usos da terra para a restauração florestal, mas elas mesmas não

sofrem ação direta da modelagem no espaço e no tempo. Para serem consideradas na expansão florestal, necessitariam ser inseridas, inclusive no *raster* de uso de terra de 1985. Mas isso traria uma deturpação da informação, pois essas áreas estratégicas seriam contabilizadas desde aquele ano. Tal ação gerariam cenários destoantes da atual configuração espacial.

As manchas provenientes da restauração ativa nas cenas da Figura 17 totalizam 306,5 hectares, distribuídos em 13 fragmentos. Esses fragmentos estão em áreas em estratégica localização em relação aos corpos hídricos e manchas florestais existentes. Em 2030, as manchas existentes tiveram suas áreas ampliadas e surgiram novas manchas florestais de menor tamanho.

No cenário de 2040, o aumento das manchas florestais existentes continuou a ocorrer sobre as áreas de pastagem. Além disso, observou-se a presença de novas manchas surgidas de forma passiva no recorte espacial. Essas novas manchas foram notadas próximas ao rio Matipó e entre as maiores formações florestais ao norte da cena. Esse crescimento disperso sugere que fatores naturais, como a proximidade com corpos d'água e a propagação de sementes, desempenharam um papel significativo na formação dessas manchas.

Em 2050, as manchas continuaram a expandir suas áreas, incluindo aquelas que surgiram após a inserção das áreas prioritárias. Algumas dessas manchas, devido à proximidade, conectaram-se, formando uma única mancha maior. Esse fenômeno explica a redução no número de fragmentos observada no cenário de 2050. Essa conectividade é crucial para a formação de corredores ecológicos, facilitando o movimento e a dispersão das espécies, e promovendo uma paisagem mais resiliente.

Este cenário exploratório proporcionaria uma recuperação de 12.815 hectares em toda a área de estudo, o que elevaria a cobertura de Mata Atlântica de 24,90% para 33%. Esse aumento significativo na cobertura florestal representa uma tendência positiva para a conservação e restauração do bioma, contribuindo também para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, a preservação da biodiversidade e a melhoria dos serviços ecossistêmicos. A recuperação dessas áreas florestais também pode ter impactos positivos na qualidade da água e no controle da erosão, além de proporcionar habitats para inúmeras espécies nativas.

Vale ressaltar que a recuperação observada nos cenários analisados ocorreu exclusivamente sobre áreas de pastagem e mosaicos de uso, evitando concorrência direta com atividades agropecuárias locais. Mesmo as plantações de eucalipto foram evitadas nos modelos,

demonstrando uma abordagem cuidadosa na alocação das áreas prioritárias para restauração. No que tange à pecuária, a pequena parcela de recuperação em relação ao total desse tipo de uso da terra não causa conflitos significativos, especialmente porque a pecuária é de baixa escala e as áreas prioritárias foram alocadas de maneira dispersa no território. A inserção das áreas prioritárias, caso seja efetivada, utilizará apenas 13,17% das áreas de pasto e mosaico de uso e, 8% em relação a área total.

4.4. Custo de oportunidade e mercado de carbono

O custo de oportunidade é um conceito econômico que representa o valor do melhor uso alternativo que se renuncia ao escolher uma opção. No contexto da manutenção e restauração florestal versus pastagem, o custo de oportunidade é o benefício econômico perdido ao se optar pela pastagem em vez da preservação ou recuperação florestal. Estudos mostram que florestas restauradas oferecem benefícios econômicos superiores a longo prazo, incluindo a valorização de serviços ecossistêmicos, como a captura de carbono e a melhoria da qualidade da água, além de promover a biodiversidade e a resiliência ambiental. A manutenção florestal também pode gerar receitas através de atividades sustentáveis, como o ecoturismo e a coleta de PFNMs.

Foi levantado o valor do aluguel da terra com pastagem entre os municípios presentes na área de estudo. Obteve-se uma média do aluguel anual no valor de R\$ 400,00 por hectare por ano. Para o modelo tendencial, até o ano de 2050, seriam convertidos 3.851 hectares de pastagem para Mata Atlântica. Esse quantitativo, caso fosse mantido com a atual cobertura de pastagem e fosse alugado para fins pecuários, gerariam uma rentabilidade de R\$ 1.540.400,00 (US\$ 280.072,00) anuais. No modelo exploratório para 2050, observou-se uma conversão de 12.815 hectares de pastagem para Mata Atlântica. Caso este quantitativo de pastagem fosse alugado para fins pecuários, geraria uma renda de R\$ 5.126.000,00 (US\$ 932.000,00) anuais.

No entanto, essas áreas convertidas à floresta, no ano de 2050, possuiriam espécies de Mata Atlântica com idade média entre 20 anos a 30 anos. Espécies de Mata Atlântica com tais idades possuem uma média de 108 toneladas de biomassa por hectare. Como espécies de Mata Atlântica possuem em torno de 50% de sua biomassa composta por carbono, tem-se uma reserva de carbono calculada por: área em hectares x 108 toneladas de biomassa por hectare x taxa de carbono 50%).

No mercado voluntário de carbono a tonelada mantida ou sequestrada é atualmente negociada a U\$ 6,00 ou entorno de R\$33,00. Logo, para o cenário predito, poderiam render R\$ 6.238.620,00 (U\$ 1.134.294,00). Já no cenário exploratório, obteria-se um ativo de R\$ 20.760.300,00 (U\$ 3.774.600,00) anuais. Esta significativa quantidade de carbono sequestrado destaca o potencial econômico e ambiental da restauração florestal em comparação à pastagem, proporcionando um benefício claro e mensurável tanto para a mitigação das mudanças climáticas quanto para a promoção da biodiversidade. Vale destacar que no ano de 2022 foi criado o Decreto 11.075 que versa sobre o estabelecimento do mercado de carbono no Brasil. Em mesmo sentido, no ano de 2021 foi criado o Decreto 10.828/21 que estabeleceu a Cédula de Produto Rural Verde (CPR-V). Tais instrumentos tendem a fortalecer ainda mais o mercado de carbono e torna-lo uma realidade operante em curto espaço de tempo. Assim, vale uma readequação dos espaços rurais para aproveitar a nova demanda do mercado que tenderá a aumentar o valor pago pela tonelada do carbono.

Aos valores acima foram incluídas as vendas diretas da tonelada de carbono no mercado voluntário para o ano de 2050. Reitera-se que produtores rurais que aderem à restauração de áreas florestais, sobretudo vinculada à produção de água, podem receber auxílio financeiro e econômico de órgãos específicos, como mencionado já na pesquisa. Atualmente, a recuperação de um hectare de Mata Atlântica, que é subsidiada com mudas, cercas e suporte técnico, ainda gera para aos proprietários da terra um valor de R\$ 300,00 por hectare ao ano. Esse valor, aplicado à área restaurada de 12.815 hectares, geraria R\$ 3.844.500,00.

Também é importante ressaltar que a CPR-V, assim como a Cédula de Produtor Rural (CPR), pode ser negociada no mercado antes da entrega. Por exemplo, com a CPR, o produtor negocia a safra antes mesmo do plantio, para obter crédito e viabilizar seu negócio. A CPR-V segue a mesma lógica: áreas destinadas à restauração florestal são pagas, mesmo que em estágio inicial. O valor pago ao produtor rural aumenta à medida que a área aumenta sua biomassa e, consequentemente, o aprisionamento de carbono.

Assim, mesmo nos anos iniciais, o processo de restauração florestal se mostra economicamente mais viável do que o aluguel de pastagens. A soma dos subsídios dos PSA e das negociações da CPR-V ultrapassa os valores dos aluguéis, tornando a restauração mais rentável. Além disso, o produtor rural recebe diretamente os benefícios dos serviços

ecossistêmicos proporcionados pela restauração florestal, como a melhoria da qualidade do solo, aumento do volume de água e biodiversidade.

Faz-se importante considerar também a possibilidade de aproveitamento de áreas restauradas por meio de SAFs. Como demonstrado por Benini *et al.*, 2016, há uma tendência de escolha dessa prática entre pequenos produtores rurais, sobretudo aqueles enquadrados como agricultores familiares, como os presentes na área de estudo.

Unir sistemas produtivos locais como SAFs são boas estratégias para a restauração florestal, vinculada a produção de produtos que gerem valor financeiro aos produtores rurais. No entorno do PESB, muitas áreas produtoras de café podem fazer uso de técnicas SAFs, já que, grande parcela utiliza da colheita do grão de forma artesanal, seja pela escala de produção, seja pelas condições de relevo que impossibilitem o uso de maquinário. Outro produto com boa aderência para a manutenção e restauração florestal é o cultivo de palmito. Apesar do não registro de cultivo na área de estudo, pode ser introduzido na cadeia produtiva, ainda mais que já se possui um mercado consumidor para o produto.

Caso os proprietários das terras arcassem com o custo da restauração ativa das áreas estratégicas florestais, ainda assim seria vantajoso (Projeto Conservador da Mantiqueira, 2020). A restauração ativa da Mata Atlântica tem um custo médio de R\$ 11.000,00 por hectare/ano para o replantio e manutenção das espécies por um período de três anos, valor este que pode sofrer variações de acordo com as especificidade de cada terreno. Portanto, restaurar 5.801 hectares demandaria um investimento total de R\$ 63.811.000,00. A área de estudo é composta por 7.751 propriedades rurais, destas 5.853 foram identificadas pelo modelo como possuidoras de áreas estratégicas para a restauração. Dividindo-se o valor total da restauração pelo número de propriedades, cada uma teria um investimento médio de R\$ 10.902,00 por ano.

Após o período de três anos de manutenção das mudas, os proprietários rurais obteriam lucros integrais provenientes da venda de créditos de carbono e de possíveis projetos de SAFs desenvolvidos em suas terras. Vale lembrar que durante os primeiros três anos de restauração ativa, os proprietários também já poderão negociar essas áreas via CPR-V. Essa ação proporcionaria melhores condições para o surgimento de novas manchas florestais espontâneas futuras e real sustentabilidade econômica.

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresentado oferece uma estratégia contributiva para a restauração da Mata Atlântica, especialmente no entorno do PESB, na Zona da Mata Mineira em Minas Gerais. Não apenas identificou áreas prioritárias para a restauração, mas também projetou cenários futuros, que demonstram possíveis benefícios financeiros e ambientais dessa prática. Ao integrar dados biofísicos e socioeconômicos, a pesquisa fornece uma visão dos impactos da restauração florestal. Academicamente, a combinação de modelagem determinística (AHP-CLP) com modelagem dinâmica probabilística poderá contribuir com o escopo metodológico para estudos futuros, que abordem a restauração florestal, oferecendo um método replicável e escalável para outras regiões e biomas.

A tese implementa um processo metodológico interconectado de diagnóstico e modelagens para a produção de cenários de restauração ambiental. Esta abordagem inovadora criou um framework que permite uma análise mais precisa e integrada das condições ambientais, combinando técnicas que consideram tanto dados estáticos quanto variáveis dinâmicas e incertas. A principal inovação reside na capacidade de criar cenários mais realistas e robustos, que podem orientar práticas de restauração, identificando áreas adequadas à restauração, bem como a estimativa de valores com serviços ecossistêmicos. Com isso, pode-se otimizar recursos e maximizar os resultados ecológicos e econômicos, uma vez que a restauração será feita de maneira coesa à dinâmica da paisagem. A abordagem metodológica tem o potencial de contribuir com projetos de restauração florestal tanto na Mata atlântica quanto em demais biomas. Além disso, a pesquisa demonstra como a restauração florestal pode contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, ao aumentar o sequestro de carbono e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se aos objetivos do Acordo de Paris e da Década da Restauração de Ecossistemas da ONU.

Nos espaços rurais Brasileiros, para o alcance de um melhor equilíbrio social, econômico e ambiental, deve-se avançar quanto aos usos da terra, de modo a induzir a recuperação de áreas degradadas. Baseado somente no previsto pelo Código Florestal, a área de estudo possui um déficit de apenas 2.273 hectares. No entanto, ao analisar a organização espacial em um contexto ambiental de conexões ecossistêmicas, verificou-se um considerável esvaziamento de manchas florestais no entorno do PESB. Enquanto o PESB demonstrou

relativa eficiência na recuperação florestal desde sua criação, o entorno é predominantemente caracterizado pela presença de pastagens, apesar de a agropecuária ser praticada em baixa escala. Como 98% das propriedades rurais se enquadram como pequenas propriedades, ficaram legalmente desobrigadas a recuperar determinadas áreas já desmatadas anteriores ao ano de 2008.

Em um primeiro momento, a desobrigação da Lei pode ser interpretada como benéfica pelos proprietários rurais, pela não obrigação da restauração. Mas com o passar dos anos, os impactos negativos acumulados pela baixa presença florestal incidem, sobretudo na própria produção agropecuária, hoje em escala local. Desta forma, para que possa haver novas possibilidades de usos da terra, faz-se necessário ações que incentivem a participação e mudança de paradigmas das comunidades locais, pois estes são os agentes que proporcionam as mudanças. O PSA pode ser uma ferramenta impulsionadora para as transformações necessárias. Além de subsídio financeiro, oferece conhecimento técnico para a melhoria ambiental e da produtividade local. Associado a isso, vale destacar os SAFs, pois possibilitam ganhos reais ao agricultor, que agrega à manutenção da floresta a produção agropecuária, tornando-se interessante em um mercado surgente de produtos agropecuários com maior responsabilidade socioambiental. Para que os SAFs sejam realmente sustentáveis, não basta apenas produzir, mas também divulgar e comercializar esses produtos. A criação de cadeias produtivas eficientes é necessária, para garantir que os produtos dos SAFs cheguem ao mercado e sejam valorizados. Ainda faltam ações políticas e comerciais, que fortaleçam tais iniciativas e as confirmem como setor econômico, social e ambiental do mercado. O mercado do crédito de carbono também poderá ser um importante impulsionador para que os proprietários visualizem os fragmentos florestais como um ativo que gera renda. Cabe lembrar que movimentos de PSA, SAFs e crédito de carbono já são operantes em distintas localidades no país e no estado, inclusive na própria área de estudo.

Conforme observado nos resultados descritos no capítulo anterior, os modelos probabilísticos demonstraram que o crescimento das manchas florestais por restauração passiva também será contínuo. Todavia, no modelo exploratório, os valores da restauração são mais interessantes, com um cenário de restauração de 12.815 hectares na área de estudo até 2050. Já o modelo tendencial (preditivo), a restauração seria mais tímida, atingindo-se 3.851 hectares em 2050. Vale lembrar que as áreas de restauração ativas obtidas na modelagem determinística foram inseridas como uma variável espacial de peso positivo no modelo de cenário exploratório.

Tal fato foi importante, sobretudo para corrigir a falta de formações ripárias nas margens dos corpos hídricos, já que o desmatamento de tais áreas já haviam ocorrido, nas propriedades rurais, anterior ao primeiro ano de uso da terra utilizado na pesquisa (1985). Após a inserção dessa variável, o modelo demonstrou maiores possibilidades de restaurações passivas futuras, sem o comprometimento das áreas produtivas locais. Estes resultados confirmam que a restauração florestal é viável e pode gerar benefícios ecológicos e financeiros, validando as hipóteses de pesquisa levantadas.

Considerando limitações e sugestões para futuras pesquisas, é necessário salientar que a modelagem de uso da terra para cenários de restauração de Mata Atlântica enfrenta diversas restrições. Primeiramente, a acurácia dos modelos depende da qualidade e disponibilidade dos dados espaciais e temporais utilizados, o que pode influenciar a precisão das projeções. Adicionalmente, a complexidade dos processos ecológicos e socioeconômicos envolvidos na restauração florestal, muitas vezes, não é completamente capturada pelos modelos atuais, resultando em incertezas nas previsões de longo prazo. Outro ponto a ser considerado é a variabilidade das condições locais, que pode afetar a aplicabilidade dos resultados em diferentes contextos regionais.

Para futuras pesquisas, é recomendável a integração de abordagens participativas, envolvendo comunidades locais na coleta de dados e na validação dos modelos, o que pode aumentar a precisão e a aceitação dos resultados. Além disso, a utilização de tecnologias avançadas, como sensores remotos de alta resolução e inteligência artificial, pode aprimorar a detecção de mudanças na cobertura da terra e a previsão de cenários futuros. Sugere-se também a realização de estudos de longo prazo para monitorar os impactos reais das práticas de restauração, comparando-os com as projeções modeladas.

Em resumo, o estudo contribui para a compreensão do diagnóstico e a prática da restauração florestal na Mata Atlântica, oferecendo uma base para políticas e práticas que promovam a sustentabilidade ambiental e socioeconômica da região. Ao mesmo tempo, fornece uma ferramenta no combate às mudanças climáticas, destacando a restauração florestal como uma estratégia eficaz para a redução do aquecimento global e a promoção de um futuro mais equilibrado e sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. DE P.; LAGO, L. A. C. *A economia Brasileira no Império, 1822-1889*. Pontifícia ed. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2010.
- AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE. Áreas de Elevado Risco de Erosão Hídrica do Solo Cálculo do Fator Topográfico (LS). *CNT – Comissão Nacional do Território*, p. 1–24, 2020.
- AGUIAR, A. P. D. *et al.* Co-designing global target-seeking scenarios: A cross-scale participatory process for capturing multiple perspectives on pathways to sustainability. *Global Environmental Change*, v. 65, n. November, 2020.
- ALMEIDA, C. *Modelagem Da Dinâmica Espacial Como Uma Ferramenta Auxiliar Ao Planejamento: Simulação De Mudanças De Uso Da Terra Em Áreas Urbanas Para As Cidades De Bauru E Piracicaba (Sp)*, Brasil. 2003. 323 f. INPE, 2003.
- ALMEIDA, D. *Recuperação ambiental Mata Atlântica*. Ilhéus/BA: [s.n.], 2016.
- AMARAL, S. S. *et al.* CO₂, CO, hydrocarbon gases and PM_{2.5} emissions on dry season by deforestation fires in the Brazilian Amazonia. *Environmental Pollution*, v. 249, p. 311–320, 2019.
- AMARO, M. A. *Quantificação do estoque volumétrico, de estacional semidecidual no município de Viçosa-MG*. 2010. 168 f. 2010.
- ANA. *Ministério Do Meio Ambiente Agência Nacional De Águas Programa Produtor De Água*. Brasília, DF: [s.n.], 2008. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>.
- ANDRADE, D.; ROMEIRO, A. Serviços ecossistêmicos e sua importância para o sistema econômico eo bem-estar humano. *Ie/Unicamp*, v. 155, p. 45, 2009.
- ARAUJO, W. *et al.* Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em automato celular. *Editora Museu Paraense Emílio Goeldi*, v. in Ferrame, p. 1–16, 2007. Disponível em: <http://www.conservacao.org/publicacoes/files_mega3/9modelagemdedinamica.pdf>.
- ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R. Deforestation slowdown in the Brazilian Amazon: Prices or policies? *Environment and Development Economics*, v. 20, n. 6, p. 697–722, 2015.
- AWAD, J.; JUNG, C. Extracting the Planning Elements for Sustainable Urban Regeneration in Dubai with AHP (Analytic Hierarchy Process). v. 76, 2022.
- AZEVEDO, E. Lobbies alimentares. *Revista Ingesta*, v. 1, n. 1, p. 53–67, 2019.
- BACHI, L. *et al.* Are There Bright Spots in an Agriculture Frontier? Characterizing Seeds of Good Anthropocene in Matopiba, Brazil. *Environmental Development*, v. 46, n. August 2022, 2023.
- BALZTER, H., BRAUN, P. W., & KÖHLER, P. Cellular automata models for vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, 1998. DOI: 10.1016/S0304-3800(97)00209-4
- BARRAZA, D. *et al.* Pesticide use in banana and plantain production and risk perception among local actors in Talamanca , Costa Rica. *Environmental Research*, v. 111, n. 5, p. 708–717, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2011.02.009>>.
- BARRETO, R. *et al.* Multicriteria methodological-rational model to evaluated urban areas : A ~ o Paulo City / Brazil case study of the S a. *Sustainable Cities and Society*, v. 67, n. January, p. 102718, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102718>>.
- BCTP. Voluntary Registry Offsets Database, 2022. Disponível: <https://gspp.berkeley.edu/research-and-impact/centers/cepp/projects/berkeley-carbon-trading-project/offsets-database>
- BENJAMIN, P. *et al.* Simulation Modeling at Multiple Levels of Abstraction . *Winter Simulation Conference*, 1998.

- BENINI, R. M. *et al.* Capítulo publicado em: Mudanças no código florestal Brasileiro: desafios para a implementação da nova lei/Organizadores: Ana Paula Moreira da Silva, Henrique Rodrigues Marques, Regina Helena Rosa Sambuichi - Rio de Janeiro: Ipea, 2016.
- BERGEZ, J.-E. *et al.* Integrating agri-environmental indicators, ecosystem services assessment, life cycle assessment and yield gap analysis to assess the environmental sustainability of agriculture. *Ecological Indicators*, v. 141, n. June, p. 12, 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X22005799>>.
- BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 8ª edição. São Paulo/SP: Ícone, 2012.
- BIELUCZYK, W. *et al.* Forest restoration rehabilitates soil multifunctionality in riparian zones of sugarcane production landscapes. *Science of the Total Environment*, v. 888, n. May, 2023.
- BLAUFELDER, C; CEOTTO, H.; SAWAYA, A.; TAYAR, G.; DORE, F; FRANK, M.; KANSY, T. Mercado regulado e voluntário. MCKinsey, 2022.
- BM. Mercado Regulatório de Carbono. Banco Mundial, 2021. Disponível: <https://www.worldbank.org/>
- BOLFE, É. L. *et al.* MATOPIBA em Crescimento Agrícola. *Revista de Política Agrícola*, v. 1, n. 4, p. 38–62, 2016.
- BONABEAU, E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002. DOI: 10.1073/pnas.082080899
- BONHAM-CARTER, G. F. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Ontario: Pergamon, 1994.
- BONDÉ, L. *et al.* Scenario-modelling for the sustainable management of non-timber forest products in tropical ecosystems. *Biota Neotropica*, v. 20, n. 2, p. 1–14, 2020.
- BONFIM, V. *DIAGNÓSTICO DO USO DO FOGO NO ENTORNO DO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO BRIGADEIRO (PESB)*, MG. 2001. 70 f. 2001. Disponível em: <<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2242E/A2242E.PDF>>.
- BÖRJESON, L. *et al.* Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, v. 38, n. 7, p. 723–739, 2006.
- BOTEQUILHA-LEITÃO, A.; AHERN, J. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, v. 59, 2002.
- BRANCALION, P. *et al.* Ecosystem restoration job creation potential in Brazil. *People and Nature*, n. July 2021, p. 1–9, 2022.
- BRANCALION, P. *et al.* Finding the money for tropical forest restoration. *Unasylva*, v. 63, n. 239, p. 41–50, 2012.
- BRASIL. DECRETO Nº 10.828, de 1º DE OUTUBRO DE 2021. *Diário Oficial da União*, p. 1, 2021a.
- BRASIL. Decreto nº 11.75 de 19 de maio de 2022. *Diário Oficial da União*, p. 4, 2022.
- BRASIL. Lei nº 12.651 de Proteção da Vegetação Nativa , de 25 de maio de 2012 (Código Florestal). *Camara dos Deputados - Centro de documentação e informação*, p. 38, 2012. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2012/lei-12651-25-maio-2012-613076-normaatualizada-pl.pdf>>.
- BRASIL. LEI Nº 9.985, DE 18 DE JULHO DE 2000. *Camara dos Deputados - Centro de documentação e informação*, 2000.
- BRASIL. *Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais*. . Brasília, DF: [s.n.], , 2021b
- BRASIL. *Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa*. . Brasília, DF: [s.n.], , 2017
- BREDOW, S. M. S.; LÉLIS, M. T. C.; CUNHA, A. M. O ciclo de alta nos preços das commodities e a economia Brasileira: uma análise dos mecanismos externos de transmissão entre 2002 e 2014. *Economia e Sociedade*, v.

25, n. 3, p. 695–731, 2016.

BRITEZ, R.M.; BORGO, M.; TIEPOLO, G.; ERRETTI, A.; CALMON, M.; IGA, R. Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas com ênfase na floresta atlântica do sul do Brasil. Colombo, Embrapa Florestas, 2006.

BRUGNARO, R.; BACHA, C. J. C. Análise da participação da agropecuária no PIB do Brasil de 1986 a 2004. *Estudos Econômicos (São Paulo)*, v. 39, n. 1, p. 127–159, 2009.

BURKHARD, B. *et al.* Landscapes' capacities to provide ecosystem services - A concept for land-cover based assessments. *Landscape Online*, v. 15, n. 1, p. 1–22, 2009.

CALDEIRA, M. V. W.; VITORINO, M. D.; SCHRAEDT, S. S.; MORAES, E.; BALBINO, R. Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa. Londrina/PR: Semina: Ciências Agrárias, v. 29, n. 1, 2008.

CARVALHO-RIBEIRO, S. *et al.* A spatially explicit index for mapping Forest Restoration Vocation (FRV) at the landscape scale: Application in the Rio Doce basin, Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 744, n. June, p. 140647, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140647>>.

CARVALHO-RIBEIRO, S. *et al.* Can multifunctional livelihoods including recreational ecosystem services (RES) and non timber forest products (NTFP) maintain biodiverse forests in the Brazilian Amazon? *Ecosystem Services*, v. 31, p. 517–526, 2018.

CARVALHO-RIBEIRO, S.; LOVETT, A. Associations between forest characteristics and socio-economic development: A case study from Portugal. *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 9, p. 2873–2881, 2009.

CHANDIO, I. A. *et al.* GIS-based analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: A review. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 6, n. 8, p. 3059–3066, 2013.

CHOUDHURY, B. U.; NENGZOUZAM, G.; ISLAM, A. Evaluation of climate change impact on soil erosion in the integrated farming system based hilly micro-watersheds using Revised Universal Soil Loss Equation. *Catena*, v. 214, n. April, p. 106306, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106306>>.

CHRISTOFOLETTI, A. *Modelagem de Sistemas Ambientais*. . São Paulo: Blücher. , 1999

COSIMO, L. H. E.; MARTINS, S. V.; GLERIANI, J. M. Suggesting priority areas in the buffer zone of Serra do Brigadeiro State Park for forest restoration compensatory to bauxite mining in Southeast Brazil. *Ecological Engineering*, v. 170, n. February, 2021.

COSTA, G. S.; FERKO, G. P.; BITAR, S. D. Multi-Objective Optimization: a Mathematical Model to Help Manage the Crop-Livestock-Forestry Integration System. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 9, p. e07628-e07628, 2024. <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/download/7628/3229>

CSR, Centro de Sensoriamento Remoto do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Mapeamento do quantitativo florestal e respectivos déficits em propriedades rurais, de acordo com o Novo Código Florestal. Belo Horizonte/MG: CSR, 2023.

COSTA, H. G. Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão. XXXVI *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, p. 122, 2002.

COSTANZA, R. *et al.* Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, v. 26, n. 1, p. 152–158, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>>.

COSTANZA, R. Social goals and the valuation of ecosystem services. *Ecosystems*, v. 3, n. 1, p. 4–10, 2000.

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

COSTANZA, R. *et al.* Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, v. 28, p. 1–16, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>>.

- CUNHA, N. R. DA S. *et al.* A intensidade da exploração agropecuária como indicador da degradação ambiental na região dos cerrados, Brasil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 46, n. 2, p. 291–323, 2008.
- DAS, S. Remote Sensing Applications : Society and Environment Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 20, n. August, p. 100379, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100379>>.
- DAĞIDIR, Buse Duygu; ÖZKAN, Barış. A comprehensive evaluation of a company performance using sustainability balanced scorecard based on picture fuzzy AHP. *Journal of Cleaner Production*, v. 435, p. 140519, 2024.
- DEGROOT, R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, v. 75, n. 3–4, p. 175–186, 2006.
- DELL'ANGELO, J. *et al.* Commons grabbing and agribusiness: Violence, resistance and social mobilization. *Ecological Economics*, v. 184, p. 107004, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107004>>.
- DINIZ, M.; COELHO, M.; CUERVO, A. How 30 years of land-use changes have affected habitat suitability and connectivity for Atlantic Forest species. *Biological Conservation*, v. 274, n. July, 2022.
- DUARTE, G. T. Os serviços das paisagens : uma abordagem teórica e aplicada para planejamento visando múltiplos benefícios Os serviços das paisagens : uma abordagem teórica e aplicada para planejamento visando múltiplos benefícios. , 2018, p. 1–96.
- EASTMAN, J. R. *Idrisi 32 Release 2 - Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs ed. Worcester, MA: [s.n.], 2001. v. 2.
- EKKO-GREEN. Crédito de Carbono: O Que É e Como Funciona e Quanto Vale?. EKKO-GREEN, 2024. Disponível: <https://ekkogreen.com.br/credito-de-carbono/>
- EMBRAPA. Megatendências da Ciência do Solo 2030. - Portal Embrapa. 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1142227/megatendencias-da-ciencia-do-solo-2030>>.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 1999.
- FAO. *The state of food and agriculture*. Rome: FAO, 2013.
- FAO. *THE STATE OF FOOD SECURITY AND NUTRITION IN THE WORLD*. Rome: [s.n.], 2021.
- FAROOQI, T. J. A. *et al.* Global progress in climate change and biodiversity conservation research. *Global Ecology and Conservation*, v. 38, n. June, p. 15, 2022.
- FARRELL, C. A. *et al.* Natural capital approaches: shifting the UN Decade on Ecosystem Restoration from aspiration to reality. *Restoration Ecology*, p. 1–6, 2021.
- FEARNSIDE, P. . Desmatamento na Amazônia Brasileira: História, índices e consequências. v. 1, n. 3, p. 680–688, 2020.
- FERREIRA, J. *et al.* *CRÉDITOS DE CARBONO EM CONCESSÕES FLORESTAIS : QUANTO O BRASIL PODE GANHAR MANTENDO A FLORESTA EM PÉ?* Instituto ed. São Paulo: [s.n.], 2021.
- FLEISCHMAN, F. *et al.* Restoration prioritization must be informed by marginalized people. *Nature*, v. 607, n. 7918, p. E5–E6, 2022.
- FOLLMANN, F. M.; FOLETO, E. M. Redefinição em ambiente SIG de áreas especialmente protegidas: caso do município de Santa Maria, (RS) Brasil. *Ateliê Geográfico*, v. 18, n. 1, p. 198–225, 2024. <https://revistas.ufg.br/ateliê/article/download/77168/40997>.
- GARRETT, R. D. *et al.* Should payments for environmental services be used to implement zero-deforestation supply chain policies? The case of soy in the Brazilian Cerrado. *World Development*, v. 152, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.105814>>.

- GARROTE, J.; GUTI, I. Can the Quality of the Potential Flood Risk Maps be Evaluated ? A Case Study of the Social Risks of Floods. *Water*, p. 1–20, 2019.
- GODOY, S.; PAMPLONA, J. O protocolo de kyoto e os países em desenvolvimento. *PESQUISA & DEBATE*, v. 18, p. 25, 2007.
- GONZALEZ, M.; TADDONIO, K.; SHERMAN, N. The Montreal Protocol: how today's successes offer a pathway to the future. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, v. 5, n. 2, p. 122–129, 2015.
- GRIMM, Volker; RAILSBACK, Steven F. Individual-based Modeling and Ecology. Princeton: Princeton University Press, 2005.
- GRISCOM, B. W. *et al.* Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 114, n. 44, p. 11645–11650, 2017.
- HARRIS, N. *et al.* Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, v. 11, n. 3, p. 234–240, 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>>.
- HARRIS, N.; GIBBS, D. *Floresta absolvem duas vezes mais co2 do que emitem por ano.* . [S.l.]: WRI Brasil. , 2021
- HAUSDORF, B. A holistic perspective on species conservation. *Biological Conservation*, v. 264, p. 109375, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109375>>.
- HAWKEN, P. *Drawdown*. New York: Penguin Books, 2017.
- HINATA, S.; BASSO, L.; SANTOS, J. Mapeamento e avaliação dos serviços ecossistêmicos entre 1985 e 2019 na sub-bacia hidrográfica do Arroio Passo Fundo (Guaíba/RS). *Sociedade & Natureza*, v. 33, p. 1–14, 2021.
- HU, X. *et al.* Anthropocene Recent global land cover dynamics and implications for soil erosion and carbon losses from deforestation. v. 34, 2021.
- HUSSAIN, M. *et al.* Competitive priorities and knowledge management: An empirical investigation of manufacturing companies in UAE. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 26, n. 6, p. 791–806, 2015.
- IBGE, I. B. DE G. E E. Censo agropecuário: características gerais das produções agropecuária e extrativista, segundo a cor ou raça do produtor e recortes territoriais específicos. *IBGE*, v. 9, p. 1–172, 2022.
- ICCBRASIL & WAYCARBON. Relatório 2022: Oportunidades para o Brasil em Mercados de Carbono. ICCBRASIL & WAYCARBON, 2022.
- IEF. *PLano de Manejo Parque estadual da serra do brigadeiro. Encarte 1 Diagnóstico do Parque*. Belo Horizonte/MG: IEF, 2007a.
- IEF. *PLano de Manejo Parque estadual da serra do brigadeiro. Encarte 2 PLanejamento e Manual de Gestão*. [S.l: s.n.], 2007b.
- IDE-SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Hidrografia. Belo Horizonte/MG: Ana/Igam, 2022. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>
- IORIS, A. A. R. Rent of agribusiness in the Amazon: A case study from Mato Grosso. *Land Use Policy*, v. 59, p. 456–466, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.09.019>>.
- IPBES. *Scenarios and Models of Biodiversity and Ecosystem Services*. [S.l: s.n.], 2016a.
- IPBES. *Scenarios and Models of Biodiversity and Ecosystem Services*. [S.l: s.n.], 2016b. v. 2.
- IPCC. Climate Change 2021 The Physical Science Basis WGI. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, v. 34, n. 2, p. F0003–F0003, 2021.
- ISMAIL, B. ADAM; GENELETTI, D. *Methods Ecol Evol - 2018 - Adem Esmail - Multi-criteria decision analysis for nature conservation A review of 20 years of.pdf. Methods in Ecology and Evolution*. [S.l: s.n.], , 2018

IVERSEN, J. S. Futures Thinking Methodologies and Options for Education. v. 2, n. Chapter 4, p. 107–120, 2006.

JAVOID, M. *et al.* Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. *International Journal of Intelligent Networks*, v. 3, n. August, p. 150–164, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.09.004>>.

JIANG, H.; WANG, J.; YU, S.; ZHENG, X.; WANG, C. Exploring global carbon market link mechanism: Efficiency evaluation in the context of carbon neutrality. *Journal of Cleaner Production journal*, 2023.

JÚNIOR, J. S.; QUINTELLA, R. H. Development: an analysis of concepts, measurement and indicators. *BAR, Curitiba*, v. 5, n. 2, art. 2, p. 104-124, Apr./June 2008

KANGAS, J. A multi-attribute preference model for evaluating the reforestation chain alternatives of a forest stand. v. 59, p. 271–288, 1993.

KHAN, Mohd Amin *et al.* Investigation of wildfire risk and its mapping using GIS-integrated AHP method: A case study over Hoshangabad Forest Division in Central India. *Environment, Development and Sustainability*, p. 1-35, 2024. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10668-024-05225-w.pdf>

LAMBIN, E. F. *et al.* Effectiveness and synergies of policy instruments for land use governance in tropical regions. *Global Environmental Change*, v. 28, p. 129–140, set. 2014.

LAMBIN, E. F. Modeling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, v. 21, n. 3, p. 375–393, 1997.

LAURANCE, W.F., NASCIMENTO, H.E.A.M., LAURANCE, S.G.W., ANDRADE, A., EWERS, R.M.; HARMS, K.E., LUIZÃO, R.C., RIBEIRO, J.E.L.S. Habitat fragmentation, variable edge effects, and the landscape-divergence hypothesis. *PLOS ONE*, 2007.

LAURILA-PANT, M. *et al.* How to value biodiversity in environmental management? *Ecological Indicators*, v. 55, p. 1–11, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.034>>.

LAUSCH, A. *et al.* Understanding and quantifying landscape structure - A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. *Ecological Modelling*, v. 295, p. 31–41, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.018>>.

LAUSCH, A.; HERZOG, F. Applicability of landscape metrics for the monitoring of landscape change: Issues of scale, resolution and interpretability. *Ecological Indicators*, v. 2, n. 1–2, p. 3–15, 2002.

LAW, B. E. *et al.* Land use strategies to mitigate climate change in carbon dense temperate forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 115, n. 14, p. 3663–3668, 2018.

LIN, J. *et al.* What is the influence of landscape metric selection on the calibration of land-use/cover simulation models? *Environmental Modelling and Software*, v. 129, n. January, p. 104719, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104719>>.

LOPES, V. C. *et al.* Land-use dynamics in a Brazilian agricultural frontier region, 1985-2017. *Land Use Policy*, v. 97, n. May 2019, p. 104740, 2020.

LOPES, M.C.; VEETIL, B. K.; SALDANHA, D. L. Buffer zone delimitation of conservation units based on map algebra and AHP technique: A study from Atlantic Forest Biome (Brazil). *Biological Conservation*, 2021.

LOVERIDGE, D. Models, simulation and convergence in the polity: An essay. *Futures*, v. 81, p. 4–14, 2016.

LYON, C. ScienceDirect Complexity ethics and UNFCCC practices for 1.5 C climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 31, p. 48–55, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.12.008>>.

MACHADO, P. A. Divulgação GLOBAL. v. 28, n. 2, p. 329–334, 2005.

MALCZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: A critical overview. *Progress in Planning*, v. 62, n.

1, p. 3–65, 2004.

MAMMADOVA, A.; BEHAGEL, J.; MASIERO, M. Making deforestation risk visible. Discourses on bovine leather supply chain in Brazil. *Geoforum*, v. 112, n. April, p. 85–95, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.03.008>>.

MANTOVANI, V. A.; TERRA, M. C.; RODRIGUES, A. F.; SILVA, C. A.; GUO, L.; MELLO, J. M. Unprecedentedly high soil carbon stocks and their spatial variability in a seasonally dry Atlantic Forest in Brazil. *Catena*, 2024.

MAPA. *Projeções do Agronegócio 2015/2016 a 2025/2026*. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/proj_agronegocio2016.pdf/view>.

MARGULIS, S. *Mudanças no Clima/; tudo que você queria e não queria saber*. Rio de Janeiro/RJ: Fundação Konrad Adenauer, 2020.

MARTENSEN, A. C.; PIMENTEL, R. G.; METZGER, J. P. Relative effects of fragment size and connectivity on bird community in the Atlantic Rain Forest: Implications for conservation. *Biological Conservation*, v. 141, n. 9, p. 2184–2192, 2008.

MCELWEE, P. *CURRENT HISTORY Climate Change and Biodiversity Loss: Two Sides of the Same Coin*. . [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <<http://online.ucpress.edu/currenthistory/article-pdf/120/829/295/483141/curh.2021.120.829.295.pdf>>.

MCGARIGAL, K. Fragstats Help. *University of Massachusetts, Amherst*, v. 4, n. April, p. 1–182, 2015.

MEA. *Ecosystems AND HUMAN WELL-BEING*. Washington: Island Press, 2005.

MEIRA-NETO, J. A. A.; MARTINS, F. R. Composição florística de uma floresta estacional semidecidual montana no município de Viçosa-MG. *Revista Árvore*, v. 26, n. 4, p. 437–446, 2002.

MELLO, C. R. DE *et al.* Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 4, p. 537–545, 2007.

METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? *Biota Neotropica*, v. 1, n. 1–2, p. 1–9, 2001.

MITTERMEIER, R. A. *et al.* *Hotspots Revisited*. [S.l.]: CEMEX, 2004.

MMA. *Estratégia Nacional para REDD +*. p. 52, 2016.

MMA. *Floresta + Carbono*. Brasília, DF: MMA, 2020.

MMA. *Serviços Ambientais*. . Brasília, DF: [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/conservacao-1/servicos-ecossistemicos/servicos-ecossistemicos-1/servicos-ecossistemicos>>.

MOTA, P. K. *et al.* Payment for Environmental Services: A critical review of schemes, concepts, and practice in Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 899, n. May, 2023.

MYGA-PI, U.; SOBALA, M. Do national parks protect natural landscapes ? v. 68, 2022.

NOBRE, C. A.; REID, J.; VEIGA, A. P. S. *Fundamentos Científicos das Mudanças Climáticas*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 1a edição. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/fundamentos_cientificos_mc_web.pdf>.

NUMATA, I. *et al.* Carbon emissions from deforestation and forest fragmentation in the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, v. 6, n. 4, 2011.

OLIVEIRA, L. J. C. *et al.* Large-scale expansion of agriculture in Amazonia may be a no-win scenario. *Environmental Research Letters*, v. 8, n. 2, 2013.

ONU. *Década sobre Restauração de Ecossistemas*. ONU, 2021. Disponível: <https://Brasil.un.org/pt-br/82566-onu-declara-d%C3%A9cada-sobre-restaura%C3%A7%C3%A3o-de-ecossistemas>

- OSMAN, M. *et al.* Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. *Nature*, v. 599, n. 7884, p. 239–244, 2021.
- OZILI, P. K. The acceptable R-square in empirical modelling for social science research. MPRA, 2023
- PACHECO, A. A. *et al.* Mineralogy, micromorphology, and genesis of soils with varying drainage along a hillslope on granitic rocks of the Atlantic forest Biome, Brazil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 42, p. 1–27, 2018.
- PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C.; TAFFARELLO, D. *Experiências de Pagamentos por Serviços Ambiental no Brasil*. São Paulo/SP: [s.n.], 2013. Disponível em: <<http://documents1.worldbank.org/curated/en/548371468021548454/pdf/864940WP0P088000PORTUGUESE0PSAlivro.pdf>>.
- PAUMGARTTEN, F. J. R. ScienceDirect Toxicology Pesticides and public health in Brazil. *Current Opinion in Toxicology*, v. 22, p. 7–11, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cotox.2020.01.003>>.
- PBMC. *Mitigação das mudanças climáticas*. COPPE ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. v. 3.
- PEREIRA, P. H. *et al.* *Projeto Conservador das Águas*. . [S.l: s.n.], , 2016
- PEREIRA, C. V. M. *et al.* Vulnerabilidade ambiental em Áreas de Preservação Permanente (APP) da Bacia Hidrográfica do Rio Potengi, RN, Brasil: Environmental vulnerability in Permanent Preservation Areas (PPA) of the Potengi River Watershed, RN, Brazil. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 10, n. 1, p. 197–221, 2024. <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/download/32574/18423>.
- PINHEIRO, J. W. B. L. J. R. DE A. N. E. A. R. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO: O CASO DO AÇUDE MARENGO, CEARÁ José. p. 16–31, 2015.
- PINTO, L. *et al.* Mata Atlântica Brasileira: os Desafios para Conservação da Biodiversidade de um Hotspot Mundial. In: ROCHA, C. *et al.* (Org.). *Biologia da conservação: Essências*. [S.l.]: Rima Editora, 2006. p. 28.
- PINTO, L. P.; BEDE, L. C. Mata Atlântica Brasileira: Os desafios para a conservação da biodiversidade de um hotspot mundial. *Essências em Biologia e Conservação*, v. January, n. 4, p. 1–24, 2006.
- PNUMA; FAO. The UN Decade on Ecosystem Restoration. p. 51, 2020. Disponível em: <<https://www.decadeonrestoration.org/strategy>>.
- PROJETO CONSERVADOR DA MANTIQUEIRA. Relatório Técnico de Atividades. Conservador da Mantiqueira, 2020. Disponível em: <https://portaldamantiqueira.org.br>. Acessado: 16de juho 2024.
- QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Versão 3.30.2. Open Source Geospatial Foundation Project, 2023. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 23 de junho 2023.
- RAJÃO, R. *et al.* The rotten apples of Brazil's agribusiness. p. 0–3, 2020.
- RAJÃO, R. *et al.* *Uma Breve História da Legislação Florestal Brasileira*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021.
- RAMOS, E. DE A.; NUVOLONI, F. M.; LOPES, E. R. DO N. Landscape Transformations and loss of Atlantic Forests: challenges for conservation. *Journal for Nature Conservation*, v. 66, n. February, p. 126152, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126152>>.
- REID, W. V. *Ecosystems and human well-being: a report on the conceptual framework working group of the Millenium Ecosystem Assessment*. [S.l: s.n.], 2005. v. 5. Disponível em: <<http://www.who.int/entity/globalchange/ecosystems/ecosys.pdf>>.
- REZENDE, C. L. *et al.* From hotspot to hopespot : An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 16, n. 4, p. 208–214, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>>.
- RIBEIRO, M. C. *et al.* The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021>>.

- RICHARDS, C. E.; GAUCH, H. L.; ALLWOOD, J. M. International risk of food insecurity and mass mortality in a runaway global warming scenario. *Futures*, v. 150, n. February 2022, p. 103173, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103173>>.
- RIZKY, Robby et al. Implementasi metode Analitical Hierarchy Process (AHP) Untuk Pemilihan Perangkat Desa di Mandalasari Kabupaten Pandeglang. *Jurnal Teknik Informatika UNIKA Santo Thomas*, p. 16-25, 2024. <https://ejournal.ust.ac.id/index.php/JTIUST/article/view/3610/2883>.
- ROCHA, D.; RIONDET, T.; SILVA, B. G. Zonas de Amortecimento em Unidades de Conservação : levantamento legal e comparativo das normas nos Estados de Minas Gerais , Rio de Janeiro e São Paulo Buffer Zones for Protected Areas : Legal Survey and Comparison of Standards in the States of Minas Ger. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 27, n. jan/jun, p. 57–70, 2013.
- RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S. COSTA, W.L.S. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. Florianópolis/SC: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007.
- ROSANO-PENÑA, C. *et al.* A measure of sustainability of Brazilian agribusiness using directional distance functions and data envelopment analysis. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, v. 21, n. 3, p. 210–222, 2014.
- ROSE, S. *et al.* The Paris Agreement and next steps in limiting global warming. *Climatic Change*, v. 142, n. 1–2, p. 255–270, 2017.
- RUSSEL, D.; CRAWLEY, E. Carbon markets and COP26. *CMS*, n. December, p. 1–5, 2021.
- SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977.
- SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.
- SABINE, C. L. *et al.* The oceanic sink for anthropogenic CO 2. *Core*, p. 29, 2004.
- SACCHIS, M.; KOZHIKKODAN, B.; LÜDERITZ, D. Buffer zone delimitation of conservation units based on map algebra and AHP technique : A study from Atlantic Forest Biome (Brazil). *Biological Conservation*, v. 253, n. February 2020, p. 108905, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108905>>.
- SANQUETTA, C. R. *et al.* Estimativa de carbono individual para araucaria angustifolia. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, v. 44, n. 1, p. 1–8, 2014.
- SARIRA, T. V. *et al.* Co-benefits of forest carbon projects in Southeast Asia. *Nature Sustainability*, v. 5, n. 5, p. 393–396, 2022.
- SANQUETTA, C.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B. GOMES, F. As florestas e o carbono. critiba/PR: Epagri-Sede, 2002.
- SARTORI, A. A. DA C. *et al.* Restauração Florestal Visando À Conservação De Recursos Hídricos Por Meio Da Combinação Linear Ponderada. *Floresta*, v. 42, n. 1, p. 201, 2012.
- SAUER, S. Soy expansion into the agricultural frontiers of the Brazilian Amazon: The agribusiness economy and its social and environmental conflicts. *Land Use Policy*, v. 79, n. August, p. 326–338, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.030>>.
- SCHWEITZER, F. Brownian Agents and Active Particles: Collective Dynamics in the Natural and Social Sciences. Berlin: Springer, 2003.
- SEEG. *Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa*. Disponível em: <<https://plataforma.seeg.eco.br/>>. Acesso em: 28 dez. 2023.
- SHALE, G. *et al.* Journal of Hydrology : Regional Studies Geographic information system (GIS) -Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed , West shoa zone , oromia regional State , Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 27, n. January, p. 100659, 2020. Disponível

em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100659>>.

SILVA, A. *et al.* Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural. *Conferência proferida na 27ª Reunião Anual da SBQ, Salvador*, v. 40, n. 12, p. 1223–1230, 2005.

SILVA, H. *et al.* Carbon stock estimate using indirect methods in a forest restoration area in Minas Gerais State | Estimativa do estoque de carbono por métodos indiretos em área de restauração florestal em Minas Gerais. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, v. 43, n. 108, p. 943–953, 2015.

SILVA, J. *et al.* CONSERVAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA: UM BALANÇO DOS ÚLTIMOS dez anos. In: CABRAL, D.; BUSTAMATE, A. (Org.). *Metamorfoses florestais: Culturas, ecologias e as transformações históricas da Mata Atlântica*. [S.l.]: Prismas, 2016. p. 458.

SINSHAW, B. G. *et al.* Prioritization of potential soil erosion susceptibility region using fuzzy logic and analytical hierarchy process , upper Blue Nile Basin , Ethiopia. *Water-Energy Nexus*, v. 4, p. 10–24, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.01.001>>.

SMMA. *Conservador das Águas*. Extrema/MG: [s.n.], 2017.

SOARES-FILHO, B. *ANÁLISE DE PAISAGEM : FRAGMENTAÇÃO E MUDANÇAS*. Belo Horizonte/MG: CSR/IGC, 1998.

SOARES-FILHO, B. S., CERQUEIRA, G. C., & PENNACHIN, C. L. DINAMICA - A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 2002.

SOARES-FILHO, B. *et al.* Cenários de desmatamento para a Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 19, n. 54, p. 137–152, 2005.

SOARES-FILHO, B. *et al.* Cracking Brazil ' s Forest Code. v. 344, n. April, 2014.

SOARES-FILHO, B. *et al.* Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. *Megadiversidade*, v. 3, 2007.

SOARES-FILHO, B. *et al.* Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: The Santarém-Cuiabá corridor. *Global Change Biology*, v. 10, n. 5, p. 745–764, 2004.

SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.; FOLLADOR, M. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. *Environmental Modelling and Software*, v. 43, p. 80–87, 2013.

SOARES-FILHO, B. S.; MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D.; ANDERSON, A.; RODRIGUEZ, H.; GARCIA, R., DIETZSCH, L.; MERRY, F., BOWMAN, M.; HISSA, L.; SILVESTRI, R.; & MARETTI, C. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010.

SOLORZANO, A.; ROGÉRIO, O.; BRASIL, L. The Atlantic Forest Ecological History: From Pre-colonial Times to the Anthropocene. In: MARQUES, M.; GRELLE, C. (Org.). *The Atlantic Forest: History, Biodiversity, Threats and Opportunities of the Mega-diverse Forest*. [S.l.]: Springer, 2021. .

SOSMA. Relatório Anual 2022. São Paulo/SP: SOS Mata Atlântica, 2022.

SOWIŃSKA-ŚWIERKOSZ, B. N.; SOSZYŃSKI, D. Landscape structure versus the effectiveness of nature conservation: Roztocze region case study (Poland). *Ecological Indicators*, v. 43, p. 143–153, 2014.

STEFANOSKI, D. C. *et al.* Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2013.

STRAND, J. *et al.* Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon Forest's Ecosystem Services. *Nature Sustainability*, v. 1, n. 11, p. 657–664, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41893-018-0175-0>>.

TEDESCO, A. M. *et al.* The role of incentive mechanisms in promoting forest restoration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 378, n. 1867, 2022.

TRANCOSO, R. Changing Amazon deforestation patterns: Urgent need to restore command and control policies

and market interventions. *Environmental Research Letters*, v. 16, n. 4, 2021.

TRATABRASIL. *Perdas de água 2023: Desafios para a disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento no Brasil*. (TrataBrasil, Org.). São Paulo/SP: [s.n.], 2023.

UN. *Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Nairobi: Ozone Secretariat, 2020. Disponível em: <https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-07/MP_Handbook_2019.pdf><<https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol>>.

UN. *KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK*. . kyoto: [s.n.], 1998

UN. THE PARIS AGREEMENT. *United Nations Framework Convention on Climate Change*, p. 60, 2015.

UN. United Nations Decade on Ecosystem Restoration (2021–2030). *United Nations*, n. March, p. 1–6, 2019. Disponível em: <undocs.org/A/RES/73/284>.

UN. *UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*. . [S.l: s.n.], 1992

UUEMAA, E.; MANDER, Ü.; MARJA, R. Trends in the use of landscape spatial metrics as landscape indicators: A review. *Ecological Indicators*, v. 28, p. 100–106, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.07.018>>.

VALENTE, R. A.; PETEAN, F. C. DE S.; VETTORAZZI, C. A. Análise multicriterial para priorização de áreas à restauração florestal. *Cerne*, v. 23, n. 1, p. 53–60, 2017.

VANDERMEER, J.; PERFECTO, I. The Agricultural Matrix and a Future Paradigm for Conservation. v. 21, n. 1, p. 274–277, 2007.

VARGAS, D. C.; DELAZERI, L. M.; FERREIRA, V. H. Mercado de Carbono Voluntário no Brasil. Na realidade e na prática. FGV Agro, 2022.

VERBURG, P. H. *et al.* Land-use change modeling : Current practice and research priorities Land use change modelling : current practice and research priorities. n. August 2017, 2004.

VETTORAZZI, C. A. *Avaliação multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando a conservação de recursos hídricos*. 2006. 151 f. 2006.

VETTORAZZI, C. A.; VALENTE, R. A. Priority areas for forest restoration aiming at the conservation of water resources. *Ecological Engineering*, v. 94, p. 255–267, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.069>>.

VIRI, N. *O que você precisa saber para começar a entender o mercado de carbono*. [S.l.]: Reset, 2020.

VOOGD, J. H. Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning. *Delftsche Uitgevers Maatschappij*, v. 1, n. 1982, p. 125, 1982. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/e0db/57bd83e32f8eaaad22769c1e3f3c0cfba057a.pdf>><https://books.google.co.in/books/about/Multicriteria_Evaluation_for_Urban_and_R.html?id=zuAOAAAAQAAJ&redir_esc=y>.

WANG, Y. *et al.* Delimitation of ecological corridors in a highly urbanizing region based on circuit theory and MSPA. *Ecological Indicators*, v. 142, n. July, p. 109258, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109258>>.

WANG, Y.; CHEN, F.; WEI, F.; YANG, M.; GU, X.; SUN, Q.; WANG, X. Spatial and temporal characteristics and evolutionary prediction of urban health development efficiency in China: Based on super-efficiency SBM model and spatial Markov chain model, *Ecological Indicators*, Volume 147, 2023.

WANNER, H.; PFISTER, C.; NEUKOM, R. The variable European Little Ice Age. *Quaternary Science Reviews*, v. 287, 2022.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite ikonos II. *Ciencia Florestal*, v. 19, n. 2, p. 169–181, 2009.

WEI, L. *et al.* Evaluating the impact of urban expansion on the habitat quality and constructing ecological

security patterns : A case study of Jiziwan in the Yellow River Basin , China. *Ecological Indicators*, v. 145, n. April, p. 109544, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109544>>.

WOLFF, W. *et al.* Optimized algorithm for evapotranspiration retrieval via remote sensing. *Agricultural Water Management*, v. 262, n. December 2021, 2022.

WOLFRAM, S. Cellular automata as simple self-organizing systems. *Caltech preprint CALT-68-938*, n. January 1983, 1982. Disponível em: <<http://cds.cern.ch/record/140047>>.

WU, J.; CHEN, X.; LU, J. International Journal of Disaster Risk Reduction Assessment of long and short-term flood risk using the multi-criteria analysis model with the AHP-Entropy method in Poyang Lake basin. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 75, n. May 2021, p. 102968, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102968>>.

XIA, H. *et al.* Science of the Total Environment Impacts of landscape patterns on water-related ecosystem services under natural restoration in Liaohe River Reserve , China. *Science of the Total Environment*, v. 792, p. 148290, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148290>>.

YANG, K. F.; GERGEL, S. E.; BAUDRON, F. Forest restoration scenarios produce synergies for agricultural production in southern Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 295, n. February, p. 106888, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106888>>.

ZHANG, T. *et al.* Increased wheat price spikes and larger economic inequality with 2°C global warming. *One Earth*, v. 5, n. 8, p. 907–916, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.07.004>>.

ZOMER, R. J.; BOSSIO, D. A.; SOMMER, R.; VERCHOT, L. V. Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. *Scientific Reports*, 2017