



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIO

EDUARDO HENRIQUE BATISTA MARCELINO

Efeitos econômicos e ecológicos da substituição de uso do solo por plantios de eucalipto

Goiânia
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Eduardo Henrique Batista Marcelino

3. Título do trabalho

EFEITOS ECONÔMICOS E ECOLÓGICOS DA SUBSTITUIÇÃO DE USO DO SOLO POR PLANTIOS DE EUCALIPTO

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.



Documento assinado eletronicamente por **Klaus De Oliveira Abdala, Professor do Magistério Superior**, em 18/04/2024, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Henrique Batista Marcelino, Discente**, em 16/05/2024, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4518237** e o código CRC **AA524A48**.

EDUARDO HENRIQUE BATISTA MARCELINO

Efeitos econômicos e ecológicos da substituição de uso do solo por plantios de eucalipto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronegócio – PPAGRO da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás – EA/UFG, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronegócio.

Área de Concentração: Sustentabilidade e Competitividade dos Sistemas Agroindustriais.

Linha de Pesquisa: meio ambiente e desenvolvimento regional.

Orientador: Prof. Dr. Klaus de Oliveira Abdala.

Goiânia
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Marcelino, Eduardo Henrique Batista

EFEITOS ECONÔMICOS E ECOLÓGICOS DA SUBSTITUIÇÃO DE
USO DO SOLO POR PLANTIOS DE EUCALIPTO [manuscrito] /

Eduardo Henrique Batista Marcelino. - 2024.

LVI, 56 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Klaus de Oliveira Abdala.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronegócio,
Goiânia, 2024.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. expansão da silvicultura de eucalipto. 2. fragilidade ambiental. 3. uso
e cobertura do solo. 4. vulnerabilidade. 5. gestão sustentável. I. Abdala,
Klaus de Oliveira, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **4/2023** da sessão de Defesa de Dissertação de **Eduardo Henrique Batista Marcelino**, que confere o título de Mestre em **Agronegócio**, na área de concentração em **Sustentabilidade e Competitividade dos Sistemas Agroindustriais**.

Aos dezessete dias do mês de abril de dois mil e vinte e quatro, a partir das 14h, na sala 13 do PPGAGRO, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “EFEITOS ECONÔMICOS E ECOLÓGICOS DA SUBSTITUIÇÃO DE USO DO SOLO POR PLANTIOS DE EUCALIPTO”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Klaus de Oliveira Abdala (EA/UFG), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Cleyzer Adrian da Cunha (FACE/UFG), membro titular interno; e Professor Doutor Luis Rodrigo Fernandes Baumann (IME/UFG), membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não** fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato aprovado pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Klaus de Oliveira Abdala, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos dezessete dias do mês de abril de dois mil e vinte e quatro.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Cleyzer Adrian Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 18/04/2024, às 11:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Rodrigo Fernandes Baumann, Professor do Magistério Superior**, em 18/04/2024, às 11:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Klaus De Oliveira Abdala, Professor do Magistério Superior**, em 18/04/2024, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4518236** e o código CRC **6838D9CD**.

DEDICATORIA

À minha mãe, cujo amor e dedicação são eternos, e ao meu irmão Tales Augusto, cuja força e inspiração iluminam meus dias. Este trabalho é dedicado a eles, que me ensinam a cada dia a importância da resiliência e do amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente ao meu orientador, Professor Klaus de Oliveira Abdala, pelo apoio incansável, confiança e conhecimento transmitido durante o trabalho. Sua paciência e atenção foram fundamentais para o sucesso desta dissertação. Muito obrigado!

Gostaria de expressar meu profundo agradecimento a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Agronegócio (PPGAgro) por compartilharem seus conhecimentos conosco e por todo o incentivo durante o curso. Obrigado por todos os momentos que passamos juntos.

Agradeço especialmente à Lindinalva, secretária do PPGAgro, por sua paciência, disponibilidade e apoio incansável ao longo do curso. Seu incentivo foi essencial para o meu sucesso.

Quero também agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) por conceder a bolsa durante todo o período de pesquisa. À Universidade Federal de Goiás (UFG) pela oportunidade de realizar o curso de pós-graduação em Agronegócio e a todos os funcionários e colaboradores da instituição, que são fundamentais para o funcionamento e manutenção desta.

Por fim, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos e familiares por seu constante apoio e incentivo. Vocês foram meus companheiros de jornada, e isso é algo que nunca vou esquecer.

RESUMO: Este estudo aborda os impactos econômicos e ecológicos da expansão da silvicultura de eucalipto em Goiás, considerando a fragilidade ambiental como um indicador-chave. Incorporando metodologias de uso corrente para análise de fragilidades, avaliar a vulnerabilidade dos ambientes naturais a partir de dados pedológicos, geológicos, de relevo e pluviométricos. Os resultados evidenciaram que Goiás possui aproximadamente 138,9 mil hectares de plantações de eucalipto, com distribuição diversificada em termos de fragilidade ambiental. A maioria das áreas está na categoria de fragilidade média (28,5%), seguida por áreas de alto grau de fragilidade (22,6%). Essas áreas de eucalipto abrangem diferentes níveis de risco ambiental, desde baixo até alto risco, com destaque para classes de muito baixo (18,8%) e muito alto (16,5%). A análise econômica baseada no (VBP) revelou que as culturas anuais apresentaram impacto negativo quando comparadas com outras classes de uso da terra substituídas por eucalipto. Esses resultados fornecem insights importantes para o planejamento e gestão sustentável das áreas de silvicultura de eucalipto em Goiás.

PALAVRAS-CHAVES: expansão da silvicultura de eucalipto, fragilidade ambiental, vulnerabilidade, uso e cobertura do solo, gestão sustentável.

ABSTRACT: This study addresses the economic and ecological impacts of eucalyptus forestry expansion in Goiás, considering environmental fragility as a key indicator. By incorporating commonly used methodologies for fragility analysis, it evaluates the vulnerability of natural environments using soil, geological, relief, and rainfall data. The results revealed that Goiás has approximately 138.9 thousand hectares of eucalyptus plantations, with diversified distribution in terms of environmental fragility. Most areas are in the medium fragility category (28.5%), followed by areas with a high degree of fragility (22.6%). These eucalyptus areas encompass different levels of environmental risk, ranging from low to high risk, with notable classes being very low (18.8%) and very high (16.5%). Economic analysis based on the Value of Agricultural Production (VBP) revealed that annual crops showed a negative impact when compared to other land use classes replaced by eucalyptus. These results provide important insights for the sustainable planning and management of eucalyptus forestry areas in Goiás.

KEYWORDS: expansion of eucalyptus forestry, environmental fragility, vulnerability, land use and cover, sustainable management.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FAO - Food and Agriculture Organization

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores

PIB – Produto Interno Bruto

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SEAPA - Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento do estado de Goiás

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

USGS - United States Geological Survey

SIEG - Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás

IMB - Instituto Mauro Borges

ND – Digital Numbers

GEE – Google Earth Engine

AcATAMa - Accuracy Assessment of Thematic Maps

HidroWeb – Rede Hidrometeorológica Nacional

ANA – Agência Nacional de Águas

mm – Milímetro

AHP - Analytic Hierarchy Process

WLC - Combinação Linear Ponderada

VBP – Valor Bruto da Produção

SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática

IFAG - Instituto para o Fortalecimento da Agropecuária de Goiás

IGP-DI - Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna

FGV – Fundação Getúlio Vargas

ha - Hectare

LAPIG - Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pontos de Treinamento e Validação	27
Figura 2 – Classificação de uso e cobertura do solo do Estado de Goiás.....	37
Figura 3 – Classificação dos plantios de eucalipto no Estado de Goiás.....	38
Figura 4 – Mapa de Fragilidade Ambiental no Estado de Goiás	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – validação e acurácia da classificação	35
Tabela 2 – Análise de substituição	40
Tabela 3 – Análise de fragilidade da classe pastagem.....	43
Tabela 4 – Análise de fragilidade da classe agricultura.....	44
Tabela 5 – Análise de fragilidade da classe Vegetação nativa.....	44
Tabela 6 – Análise de fragilidade da classe Silvicultura.....	45
Tabela 7 – Análise econômica	46
Tabela 8 – Análise econômica proporcional a área	48
Tabela 9 – Distribuição das áreas substituídas por mesorregiões	48
Tabela 10 – efeito econômico de substituição por mesorregião do estado de Goiás	49

Sumário

1. Introdução.....	14
1.1 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo Geral.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
2. Referencial Teórico	17
2.1 Fragilidade Ambiental	17
2.1.1 Solo	19
2.1.2 Geologia	19
2.1.3 Geomorfologia	20
2.1.4 Relevo.....	21
2.1.5 Clima	21
2.1.6 Cobertura Vegetal	22
2.1.7 Hidrologia.....	22
2.2 Random Forest.....	23
2.3 Métricas de Validação	23
3. Materiais e Métodos	24
3.1 Levantamento dos dados	24
3.2 Desenho da amostragem.....	25
3.3 Coleta dos dados	26
3.4 Processamento dos dados	26
3.5 Pós-processamento dos dados.....	28
3.6 Quantificação de Área.....	28
3.7 Análise de Substituição.....	29
3.8 Fragilidade Ambiental	29
3.7.1 Fragilidade do solo.....	29
3.7.2 Fragilidade da geologia	30

3.7.3 Fragilidade do relevo.....	30
3.7.4 Fragilidade da precipitação.....	30
3.7.5 Fragilidade do uso e ocupação do solo.....	31
3.7.6 Aplicação da análise multicritério para o mapeamento da fragilidade.....	26
3.8 Análise econômica.....	28
4. Resultados e Discussões.....	29
4.1 Validação da classificação.....	29
4.2 Classificação de uso e cobertura do solo.....	35
4.3 Classificação de plantios de eucalipto.....	38
4.4 Análise de substituição e Fragilidade Ambiental.....	39
4.4.1 Fragilidade por categoria substituída.....	38
4.5 Análise Econômica.....	46
5. Considerações finais.....	50
6. Impacto Social e Relevância da Pesquisa.....	48
7. Referências.....	52

1. Introdução

De acordo com os dados da FAO (2020), as florestas globais ocupam uma área total de 4,0 bilhões de hectares. Dentre essa extensão, 3,74 bilhões de hectares são representados por florestas nativas, o que equivale a 93% do total. Por sua vez, a cobertura florestal plantada corresponde a 291 milhões de hectares, representando os restantes 7%. As nações com as maiores extensões de florestas plantadas são a China, com 85 milhões de hectares, seguida pelos Estados Unidos, com 28 milhões de hectares, e a Rússia, com 19 milhões de hectares. O Brasil ocupa a oitava posição nesse ranking, com uma extensão de 9,93 milhões de hectares.

O setor de florestas plantadas no Brasil não apenas constitui uma extensa parcela territorial, abrangendo cerca de 9,93 milhões de hectares, mas também representa significativa contribuição econômica. Dentro desse panorama, os plantios de eucalipto emergem como protagonistas, ocupando 75,8% desse território, seguidos pelos plantios comerciais de Pinus, que correspondem a 19,4%. Outras variedades de plantios complementam esse cenário, totalizando 4,8% da área destinada (IBÁ, 2022).

Com um aumento de 20,5% no Produto Interno Bruto (PIB) do setor no período de 2010 a 2021, representando 1,2% da economia brasileira, a cadeia produtiva florestal ocupa a sexta posição no ranking das atividades características do setor industrial. Fica atrás apenas das atividades de construção civil (5,1%), eletricidade, gás, água, esgoto e limpeza urbana (2,6%), alimentos e bebidas (2,3%), petróleo e gás (1,8%) e máquinas e equipamentos (1,3%). (IBÁ, 2022)

O ano de 2021 se destacou para o setor, evidenciando um valor bruto da produção estimada de R\$224,6 bilhões de reais, representando incremento de 27,9% em comparação ao ano anterior. Esses números não apenas refletem a robustez do setor de florestas plantadas, apontando para sua relevância econômica e seu papel na dinâmica agrícola brasileira representando 4,2% da participação total do setor agropecuário, contribuindo com mais de 553 mil postos de trabalho diretos e 1,59 milhão de empregos indiretos. (IBÁ, 2022).

O êxito dos cultivos florestais no Brasil pode ser atribuído a diversas vantagens competitivas. As condições ambientais favoráveis para a silvicultura intensiva, a adaptabilidade das espécies utilizadas, o rápido crescimento e a alta produtividade da Madeira, associados a ciclos de corte de curta duração, contribuem significativamente para o sucesso do setor. Além disso, a disponibilidade de informações e técnicas silviculturais, a presença de indústrias florestais modernas e diversificadas e a produção de produtos de alta qualidade respondem pelo

desempenho do setor permitindo atender tanto ao mercado nacional quanto às demandas internacionais de exportação. (REIS et al., 2018).

As áreas de plantio comercial no Brasil concentram-se predominantemente nos estados de Minas Gerais (23,2%), São Paulo (12,7%) e Paraná (11,9%). Na região Centro-Oeste, apesar de expressiva participação (14,7%), a silvicultura intensiva permaneceu subdesenvolvida por muitos anos, emergindo como uma nova fronteira da silvicultura no país. O crescimento das florestas plantadas em Goiás registrou aumento de 45,1% durante o período de 2012 a 2021 e ocuparam aproximadamente 191.528 hectares, representando cerca de 0,56% do território estadual. Eucalipto (*Eucalyptus* spp.), pinus (*Pinus* spp.) e seringueira (*Hevea brasiliensis* L.) são as espécies mais comuns nessa região. Esses resultados refletem não apenas a expansão geográfica do cultivo, mas também a diversificação das espécies plantadas, consolidando Goiás como um player em ascensão no cenário das florestas plantadas no Brasil (IBÁ, 2022).

A concentração significativa de plantios florestais ocorre principalmente na mesorregião do sul Goiano, englobando municípios como Catalão, Rio Verde, Chapadão do Céu, Mineiros, Quirinópolis e Jataí. Essas áreas se destacam pelo cultivo de eucalipto e também desempenham um papel economicamente relevante para o agronegócio goiano (CABRAL et al., 2019).

De acordo com Cabral et al. (2019), há divergências entre os dados de área de plantios comerciais divulgados pelo Instituto Brasileiro de Árvores (IBÁ) e os mapeados. Essa disparidade é atribuída ao método de quantificação do IBÁ, que subestima a área total ao considerar apenas os dados dos associados da Indústria Brasileira de Árvores. Isso é evidenciado pela discrepância nas informações sobre a área de plantios comerciais do IBÁ em comparação com os dados da Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento do estado de Goiás, que utiliza informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Essas inconsistências ressaltam a importância de considerar diversas fontes de dados ao analisar a extensão real dos plantios comerciais, destacando a necessidade de uma abordagem mais abrangente e colaborativa na coleta e compilação de informações sobre o setor florestal.

Apesar da pujança econômica da recente expansão da silvicultura no estado de Goiás é importante considerar que alterações nos componentes fundamentais da natureza, ou em suas interações, como relevo, solo, clima, vegetação e recursos hídricos, têm o potencial de acarretar desequilíbrios significativos e comprometer a funcionalidade do sistema ambiental. Essas mudanças podem desestabilizar o estado de equilíbrio dinâmico que caracteriza os ecossistemas naturais.

Na perspectiva da ecodinâmica, conforme analisada por Ross (2012), o meio ambiente é examinado à luz da teoria geral dos sistemas, que parte da premissa de que na natureza as trocas de energia e matéria ocorrem por meio de relações em equilíbrio dinâmico. No entanto, esse equilíbrio é frequentemente perturbado pelas intervenções humanas, resultando em estados de desequilíbrio temporários ou mesmo permanentes. Ao considerar esse cenário, o planejamento e a gestão ambiental são providos de informações que facultam a tomada de decisões, especialmente em políticas que visam conciliar o desenvolvimento socio econômico com a preservação e conservação da natureza.

Nesse contexto, é imperativo possuir um conhecimento aprofundado das fragilidades potenciais e emergentes do meio ambiente, bem como dos potenciais do mesmo. Compreender como as atividades humanas podem afetar os sistemas naturais e identificar as vulnerabilidades inerentes torna-se essencial para desenvolver estratégias de planejamento e gestão eficazes. A abordagem da ecodinâmica destaca a necessidade de considerar não apenas as interações diretas, mas também os efeitos cumulativos e de longo prazo das ações humanas sobre os ecossistemas.

Os mapas de fragilidades e potencialidades ambientais desempenham um papel fundamental no âmbito do planejamento territorial ambiental em diversas escalas. Conforme destacado por Ross (2012), a importância desses mapas reside na capacidade de avaliar de forma integrada as características naturais do meio ambiente, conciliando suas potencialidades com suas restrições. Sob a perspectiva de Schiavo et al. (2016), o mapeamento da fragilidade ambiental contribui para uma visão holística do meio ambiente, facilitando a compatibilização entre suas potencialidades e restrições. Isso é fundamental para orientar a implementação de políticas e práticas que promovam o desenvolvimento sustentável, minimizando os impactos negativos sobre os ecossistemas e garantindo a preservação a longo prazo da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos.

O sensoriamento remoto emerge como instrumental na coleta de dados que subsidiam informações necessárias ao planejamento ambiental. Utilizando tecnologia que possibilitam a captura e registro da energia refletida ou emitida pela superfície terrestre, essa abordagem envolve a detecção e a medição quantitativa das respostas provenientes das interações entre a radiação eletromagnética e os materiais terrestres. No contexto específico do setor florestal, o sensoriamento remoto possibilita a detecção qualitativa e quantitativa de vegetação verde, permitindo, também, a distinção eficaz de diferentes tipos de cobertura e uso da terra. Assim, ao proporcionar uma visão abrangente e precisa do ambiente, o sensoriamento remoto contribui significativamente para a análise e gestão eficaz dos recursos naturais, facilitando a tomada de

decisões informadas no âmbito do manejo florestal e ambiental (CANO; MARCATO JUNIOR, 2021).

1.1 Objetivos

Considerando o contexto apresentado anteriormente, qual seja, a expressividade econômica da expansão da produção de eucalipto, a divergência de informações de localização e dimensões dessa expansão e os impactos ecológicos advindos dessa dinâmica de expansão, este trabalho questiona a percepção dos impactos advindos da expansão da silvicultura de Eucalipto no estado de Goiás, sendo tal questionamento operacionalizado pelos seguintes objetivos:

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é compreender impactos econômicos e ecológicos da expansão de silvicultura de eucalipto no estado de Goiás.

1.2.2 Objetivos Específicos

Identificar a localização dos plantios de Eucalipto no estado de Goiás.

Analisar as fragilidades ambientais das localizações de eucalipto no estado de Goiás.

Avaliar o impacto econômico advindo da expansão de plantios de eucalipto em suas devidas localidades.

2. Referencial Teórico

2.1 Fragilidade Ambiental

A conversão de ambientes naturais em áreas antropizadas, aliada à ausência de planejamento e à limitada consciência ecológica das atividades humanas, resulta em diversos níveis de impacto nos ambientes naturais, variando conforme as características intrínsecas dos ecossistemas (VALLE et al., 2016).

Diante desse cenário, a análise ambiental e o planejamento territorial emergem como estudos essenciais para embasar a tomada de decisões relacionadas à ocupação da terra e à utilização dos recursos naturais. Essas abordagens desempenham um papel fundamental não apenas na formulação de políticas públicas, mas também na implementação de estratégias para

o desenvolvimento local sustentável. Além disso, contribuem significativamente para a elaboração de modelos eficazes de ordenamento físico-territorial, promovendo a integração equilibrada entre as necessidades humanas e a preservação ambiental (BACANI et al., 2015).

Nessa perspectiva, destacam-se estudos sobre fragilidade ambiental, os quais analisam a vulnerabilidade de um ambiente à degradação, considerando que a fragilidade natural pode ser acentuada por intervenções humanas (VALLE et al., 2016).

Ross (1994) é reconhecido como um dos pioneiros nessas investigações, apresentando uma metodologia que integra informações sobre solo, geologia, geomorfologia, relevo, clima e cobertura vegetal. Essa abordagem resulta na identificação de áreas com distintos graus de fragilidade.

Conforme discutido por Alves et al. (2018) a análise de fragilidade, entendida como a vulnerabilidade de ambientes em relação a suas características físicas, sociais e econômicas, representa uma abordagem fundamental para a compreensão de alterações nos ecossistemas, sobretudo no contexto do planejamento ambiental de uma determinada área de interesse. Essa compreensão contribui para a minimização de impactos relacionados a processos erosivos, movimentos de massa e inundações (SANTOS; MARCHIORO, 2020). Constituindo informações para orientar a implementação de políticas públicas, especialmente em áreas com maior fragilidade ambiental (VIEIRA et al., 2021).

Cada unidade de paisagem, além de apresentar potencialidades, revela também fragilidades que, sob intervenções humanas, desestabilizam as funcionalidades do sistema, (ROSS, 2012). Conforme discutido por Souza et al. (2020) modificações no ecossistema, envolvendo elementos como relevo, solo, clima, vegetação e recursos hídricos, têm o potencial de provocar desequilíbrios, comprometendo a funcionalidade e o equilíbrio de sistemas dinâmicos.

Ross (1994) e Ross (2012) ressaltam que as Unidades Ecodinâmicas podem exibir diferentes graus de fragilidade Potencial, levando em consideração características inerentes à paisagem, mas mantêm estabilidade devido à escassa ou nenhuma intervenção humana. Por outro lado, a Fragilidade Emergente, que também considera cobertura da terra e usos antrópicos, caracteriza ambientes instáveis devido às intervenções humanas.

Tricart (1977) propõe uma classificação tripartida para os meios morfodinâmicos: (1) meios estáveis, caracterizados pela presença de cobertura vegetal e ausência de interferências antrópicas, evidenciando processos de pedogênese; (2) meios integradores, que representam a transição entre meios estáveis e instáveis, apresentando processos de pedogênese-morfogênese;

e (3) meios fortemente instáveis, onde predominam processos de morfogênese, impulsionados pela degradação antrópica.

A intensificação de processos naturais, como o aumento da erosão, sedimentação de canais e eventos de seca, decorre também da exploração excessiva de recursos naturais, conforme apontado por Vick et al. (2021). Atividades como mineração, agropecuária, silvicultura, indústria, entre outras, impulsionadas pela nova ordem econômica mundial, intensificam a exploração de recursos naturais, resultando na redução do espaço natural e em impactos adversos ao ambiente, como o aumento da fragilidade ambiental (SOUZA; REBELATO, 2021; SOARES; MARTINS, 2021).

Bacani (2015), Trevisan e Moschini (2016), Valle, Francelino e Pinheiro (2016), França, Piuzana e Ross (2017), Martins et al. (2018) e Gouveia e Ross (2019), apresentam seus estudos sobre a fragilidade ambiental e atestam seu valor no diagnóstico, na conservação e no planejamento ambiental e territorial, tanto em escala regional quanto local. Esses estudos representam referências fundamentais para compreender e abordar os desafios relacionados à fragilidade ambiental, oferecendo subsídios valiosos para a formulação de estratégias eficazes de conservação e desenvolvimento sustentável.

2.1.1 Solo

A fragilidade ambiental associada ao componente solo refere-se à suscetibilidade desse elemento a processos de degradação e às influências antrópicas, que podem comprometer sua qualidade e funcionalidade. Diversos fatores, como textura, estrutura, composição química e capacidade de retenção de água, contribuem para a fragilidade do solo. Em áreas onde o solo é frágil, a ocorrência de processos erosivos, de compactação do solo, a perda de fertilidade e degradação da qualidade do solo são mais prováveis. A ação humana, incluindo práticas agrícolas inadequadas, desmatamento, urbanização desordenada e uso indiscriminado de recursos naturais, pode intensificar a fragilidade do solo (ROSS, 2012).

A caracterização da fragilidade ambiental do solo envolve a avaliação desses fatores, identificando áreas mais propensas a impactos negativos e degradação (COGO, 2022). Métodos como análises físicas, químicas e geoespaciais são frequentemente empregados para compreender a condição do solo e mapear sua fragilidade em diferentes contextos ambientais.

2.1.2 Geologia

A fragilidade ambiental associada ao componente geologia diz respeito à susceptibilidade dessa estrutura geológica a processos de degradação, bem como às influências antrópicas capazes de comprometer a estabilidade e funcionalidade do ambiente. A geologia, como componente fundamental na composição da paisagem, desempenha um papel fundamental na determinação da fragilidade ambiental de uma região específica.

Fatores geológicos, como composição mineralógica, estruturação e permeabilidade das rochas, exercem influência direta na estabilidade do terreno. Em áreas onde a geologia é frágil, podem ocorrer processos como deslizamentos de terra, subsidência do solo e instabilidade de encostas, especialmente quando sujeitas a intervenções humanas inadequadas, como desmatamento, mineração descontrolada e construções não planejadas.

A caracterização da fragilidade ambiental relacionada à geologia demanda a análise detalhada desses fatores geológicos, identificando áreas mais propensas a eventos adversos (CARVALHO et al., 2020). Técnicas como cartografia geológica, estudos geoambientais e modelagem geoespacial são comumente utilizadas para compreender a influência da geologia na fragilidade ambiental e subsidiar estratégias de conservação e planejamento ambiental sustentável. Essa abordagem permite compreender a geologia do ambiente e minimizar impactos negativos, mediante técnicas que promovam a estabilidade geológica, preservando a integridade do ambiente em questão.

2.1.3 Geomorfologia

A fragilidade ambiental associada ao componente geomorfologia refere-se à vulnerabilidade dessa configuração da superfície terrestre a processos de degradação, tanto naturais quanto decorrentes de atividades humanas (CHEN et al., 2018; PANIZZA, 2018). A geomorfologia, que abrange a configuração do relevo, processos erosivos, formação de feições e modelagem da paisagem, desempenha um papel fundamental na determinação da resistência de uma área a alterações e perturbações.

Fatores como inclinação do terreno, tipo de solo, e presença de cobertura vegetal influenciam diretamente na estabilidade geomorfológica (CHEN et al., 2018). Áreas com maior fragilidade geomorfológica são propensas a eventos como deslizamentos de terra, erosão acelerada, e instabilidade de encostas, especialmente quando sujeitas a práticas humanas inadequadas, como desmatamento, urbanização desordenada, e atividades de mineração.

A caracterização da fragilidade ambiental relacionada à geomorfologia envolve a análise pormenorizada desses fatores geomorfológicos, identificando áreas mais suscetíveis a processos erosivos e instabilidades (CHEN et al., 2018). Técnicas como modelagem

geoespacial, sensoriamento remoto e análises topográficas são frequentemente empregadas para compreender a influência da geomorfologia na fragilidade ambiental e orientar estratégias de conservação e planejamento territorial sustentável.

2.1.4 Relevô

A fragilidade ambiental relacionada ao componente relevo diz respeito à suscetibilidade das características topográficas de uma determinada área a processos de degradação, sejam eles naturais ou originados por atividades humanas (ZHANG et al., 2019; LIU et al., 2020).

Fatores como inclinação do terreno, altitude, e presença de características como encostas e vales influenciam diretamente na fragilidade do relevo. Áreas com relevo frágil são mais propensas a processos erosivos, deslizamentos de terra e instabilidades, especialmente quando sujeitas a intervenções humanas inadequadas, como desmatamento, construção em encostas e práticas agrícolas intensivas. A caracterização da fragilidade ambiental relacionada ao relevo envolve a análise detalhada desses fatores topográficos, identificando áreas mais suscetíveis a eventos adversos (ZHANG et al., 2019).

Técnicas como modelagem geoespacial, análises de terreno e sensoriamento remoto são comumente empregadas para compreender a influência do relevo na fragilidade ambiental e orientar estratégias de conservação e planejamento territorial sustentável.

2.1.5 Clima

A fragilidade ambiental associada ao componente clima refere-se à vulnerabilidade de um ambiente em relação às condições climáticas e aos eventos climáticos extremos, podendo impactar significativamente sua estabilidade e funcionalidade. O clima, que abrange padrões atmosféricos como temperatura, precipitação, ventos e eventos extremos, desempenha um papel importante na dinâmica dos ecossistemas. (IPCC, 2014)

Aumentos nas temperaturas, mudanças nos padrões de precipitação e eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, tempestades intensas ou elevação do nível do mar, podem desencadear processos erosivos, inundações, perda de biodiversidade e outros impactos ambientais (IPCC, 2014).

A caracterização da fragilidade ambiental relacionada ao clima envolve a análise detalhada desses fatores climáticos, identificando áreas mais suscetíveis a eventos climáticos adversos (SENEVIRATNE et al., 2012). Técnicas como modelagem climática, análises de tendências e projeções climáticas são frequentemente empregadas para compreender a influência do clima na fragilidade ambiental e orientar estratégias de adaptação e mitigação.

2.1.6 Cobertura Vegetal

A fragilidade ambiental associada ao componente cobertura vegetal refere-se à sensibilidade e vulnerabilidade de um ambiente em relação à presença, distribuição e saúde dos ecossistemas vegetais que o compõem. A cobertura vegetal desempenha papel na manutenção da biodiversidade, na regulação do ciclo hidrológico, na proteção do solo contra erosão e na oferta de serviços ecossistêmicos essenciais (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005).

Fatores como desmatamento, expansão urbana, incêndios florestais e práticas agrícolas inadequadas podem comprometer a integridade da cobertura vegetal, resultando em processos de degradação ambiental. A perda de biodiversidade, a redução na capacidade de retenção de água pelo solo e o aumento da suscetibilidade a eventos climáticos extremos são alguns dos impactos associados à fragilidade da cobertura vegetal (FOLEY et al., 2005).

A caracterização da fragilidade ambiental relacionada à cobertura vegetal envolve a análise da distribuição, saúde e diversidade das comunidades vegetais, identificando áreas mais suscetíveis a processos de degradação (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005). Técnicas como sensoriamento remoto, inventários florestais e análises de padrões de uso da terra são frequentemente empregadas para compreender a influência da cobertura vegetal na fragilidade ambiental e orientar estratégias de conservação e restauração.

2.1.7 Hidrologia

A fragilidade ambiental relacionada ao componente hidrologia refere-se à suscetibilidade de uma área aos processos hidrológicos e aos impactos relacionados à dinâmica da água, incluindo rios, lagos, aquíferos e outros corpos d'água (VÖRÖSMARTY et al., 2010; GLEICK, 2018). A hidrologia desempenha papel na determinação da estabilidade e resiliência de ecossistemas aquáticos e terrestres, sendo um fator determinante na saúde ambiental.

Fatores como variações na disponibilidade de água, mudanças nos padrões de fluxo de rios, contaminação da água e eventos extremos, como inundações ou secas, são considerados na avaliação da fragilidade hidrológica. Esses fatores podem afetar diretamente a biodiversidade aquática, a qualidade da água e a capacidade do ambiente em sustentar ecossistemas dependentes da água.

A caracterização da fragilidade ambiental relacionada à hidrologia envolve a análise detalhada desses fatores hidrológicos, identificando áreas mais suscetíveis a eventos adversos (VÖRÖSMARTY et al., 2010). Técnicas como modelagem hidrológica, monitoramento de

qualidade da água e análises de padrões de uso da terra são frequentemente empregadas para compreender a influência da hidrologia na fragilidade ambiental e orientar estratégias de conservação e gestão sustentável dos recursos hídricos.

2.2 Random Forest

O classificador Random Forest, um modelo baseado em árvores, e as máquinas de vetores de suporte, que buscam maximizar a margem entre diferentes classes, são empregados neste estudo. Este classificador consiste em uma amalgama de classificadores baseados em árvores, em que cada árvore é gerada através de um vetor aleatório, independente do vetor de entrada. Cada árvore contribui com um voto unitário para a classe mais prevalente, visando a classificação de um vetor de entrada (Breiman 1999).

A implementação do Random Forest neste estudo implica na seleção supervisionada de características, ou uma combinação delas, em cada nó para o desenvolvimento de uma árvore. Ao projetar uma árvore de decisão, é necessário escolher uma medida de seleção de atributos e um método de poda. Diversas abordagens para a seleção de atributos são aplicadas na indução de árvores de decisão, muitas delas associadas a uma medida direta de qualidade atribuída ao atributo.

O classificador utiliza o Índice de Gini como medida de seleção de atributos, quantificando a impureza do atributo em relação às classes. Para um conjunto de treinamento T dado, a seleção de um caso aleatório (pixel) e a atribuição deste a uma classe C_i são utilizadas para calcular o Índice de Gini (Breiman et al. 1984).

Os parâmetros definidos pelo usuário para a construção do classificador Random Forest incluem o número de características empregadas em cada nó para a geração de uma árvore e a quantidade total de árvores a serem desenvolvidas. Em cada nó, apenas as características selecionadas são consideradas para encontrar a melhor divisão. Dessa forma, o classificador de floresta aleatória consiste em N árvores, onde N é o número definido pelo usuário, e para classificar um novo conjunto de dados, cada caso é processado por todas as N árvores. A classe atribuída é aquela que obtém a maioria dos votos entre as N árvores para o respectivo caso.

2.3 Métricas de Validação

O Sensoriamento Remoto é uma técnica consolidada na aquisição de dados relacionados à superfície da Terra, fornecendo informações essenciais para diversos estudos e influenciando diretamente processos decisórios. A precisão desses dados é fundamental para o sucesso das análises provenientes desta técnica. No contexto de uso e cobertura do solo, a acurácia temática

avalia a concordância, geralmente representada por uma matriz de confusão, entre a classificação realizada e a verdade terrestre. Diversos índices de acurácia, como acurácia total, Kappa, acurácias do usuário e do produtor, são aplicados para quantificar essa concordância.

Na estatística, a precisão mensura a dispersão dos dados próximos a um valor, enquanto a acurácia está relacionada à veracidade da obtenção de dados em um intervalo de probabilidade especificado. Assim, medir a acurácia vai além da simples mensuração da precisão dos dados.

A acurácia total, também conhecida como acurácia global segundo Story e Congalton (1986), visa analisar a concordância geral entre os dados de classificação e os dados de referência. Essa métrica é calculada pela soma da diagonal principal da matriz de confusão, dividida pelo total de amostras, representada pela divisão do total de pixels classificados corretamente (diagonal da matriz) pelo número total de pixels da matriz.

A análise Kappa, desenvolvida por Cohen (1960), é uma técnica multivariada discreta utilizada na avaliação de acurácia. Ela mede a proporção de concordância, eliminando a influência da chance ao acaso. A estatística KHAT gerada pela análise Kappa indica quão bem os dados de classificação concordam com os dados de referência.

As métricas específicas de acurácia do usuário e do produtor estão relacionadas às estimativas das frações de pixels corretamente classificados para cada classe. A acurácia do usuário é lida com o erro de omissão, ou seja, o erro ao atribuir um pixel a uma classe quando pertence a outra. Já a acurácia do produtor refere-se às frações amostrais de pixels corretamente atribuídos a suas classes pelos classificadores, associada ao erro de omissão, que ocorre quando um pixel da classe não é mapeado corretamente.

3. Materiais e Métodos

3.1 Levantamento dos dados

As imagens utilizadas para elaboração dos produtos e análise da ocupação do solo na área de estudo foram do satélite Sentinel-2, e o ano de referência selecionado para o mapeamento e análises o de 2023. A escolha desse ano e o período de estação seca justifica-se pela expansão atual de floresta plantada no estado e pela ausência de nuvens, nesta estação, que possam dificultar a identificação.

A obtenção das imagens contendo as bandas multiespectrais foi realizada da base de dados do Earthexplorer, sendo uma interface online de download de imagens de satélite gratuita, desenvolvido pelo United States Geological Survey (USGS). Já os shapefiles de limites

municipais utilizados neste projeto, foram obtidos no Sistema de Geoinformações do estado de Goiás (SIEG), um portal público e gratuito mantido atualmente pelo Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos (2013) com apoio de outras autarquias estaduais.

As cenas selecionadas foram as imagens ortorretificadas, com nível de correção atmosférico (Level 2A), estas imagens são produtos pré-processados, apresentando calibração dos números digitais (ND) e valores de reflectância com referência ao topo da atmosfera.

3.2 Desenho amostral

O conjunto de pixels utilizados nesta análise foi constituído por meio de um cálculo por amostragem estratificada, onde N1 refere-se às amostras de validação obtidas, enquanto N2 compreende o conjunto de amostras de treinamento do modelo. Considerando a proporção de pontos como sendo 30% para N1 e 70% para N2, o valor encontrado para N1 foi de 793, resultando em N2 = 1847.

O valor de N1 foi determinado através da aplicação da Equação 1, com o objetivo de alcançar um tamanho de amostra que ofereça uma margem de erro de 5% e um nível de confiança de 95%. Considerando que N1 corresponde a 30% do total das amostras (amostras de validação), N2 é obtido ao extrapolar o valor de N1 de forma proporcional aos 70% restantes (amostras de treinamento).

Cada pixel possui resolução de (10 m x 10 m) e foram sorteados do mosaico de imagens do satélite Sentinel-2, recortadas para o Estado de Goiás. Um estimador de áreas para o método de amostragem estratificada e alocação uniforme (COCHRAN, 1977) foi utilizado para estimar as áreas referentes a cada uso da terra para o retrato temporal.

As estimativas foram calculadas (equação 1) em função da população total (pixels compreendidos pelos limites territoriais de Goiás), o tamanho da amostra resultante foi de Nt = 2640 pontos, com margem de erro de 5% e confiança de 95% para a estimativa intervalar da acurácia do modelo.

$$N1 = \frac{\sum \frac{(Wh^2 \sqrt{p(1-p)})}{wh}}{\left(\frac{e}{z}\right)^2 + \frac{1}{N} \sum Wh \sqrt{p(1-p)}}$$

Onde:

N1 = Tamanho da amostra da validação,

Wh = Tamanho do extrato da população da classe h;

p = Proporção;

e = Margem de erro;

z = Quantil da distribuição da normal padrão referente ao nível de confiança;

wh = Proporção do tamanho do extrato pela quantidade de extratos;

N = Tamanho total da população;

3.3 Coleta dos dados

A coleta dos dados de uso e cobertura do solo foi realizada em duas etapas, a primeira etapa foi localizar os plantios de eucalipto no estado e realizar a coleta destes pontos, já na segunda etapa utilizou-se os pontos de validação do MapBiomias para compor as classes de uso e cobertura do solo de não eucalipto (agricultura, pastagens, área urbana, vegetação nativa, solo exposto, água e não observado.)

Por intermédio da Federação das Indústrias do Estado de Goiás, foram obtidos acessos aos produtores de eucalipto no estado, assim como a profissionais atuantes na área. Para abordar os aspectos relacionados aos plantios de eucalipto, foi adotada uma estratégia de coleta de dados localizada e detalhada. Esta abordagem envolveu consultas a supervisores, produtores, engenheiros florestais com expertise nas áreas de plantio de eucalipto em Goiás. Com base em supervisão direta nas localidades, esse método permitiu uma coleta de 1322 pontos, capturando nuances que poderiam ser facilmente negligenciadas por abordagens mais generalizadas.

Nos pontos correspondentes aos outros usos e cobertura do solo, a coleta de dados seguiu uma abordagem diferente. Optou-se por utilizar os pontos de validação disponibilizados pela plataforma MapBiomias, reconhecida por sua abrangência e precisão na caracterização do uso da terra. Essa escolha proporcionou uma comparação entre áreas de eucalipto e não eucalipto, fundamentada em dados provenientes de uma fonte reconhecida pela sua confiabilidade.

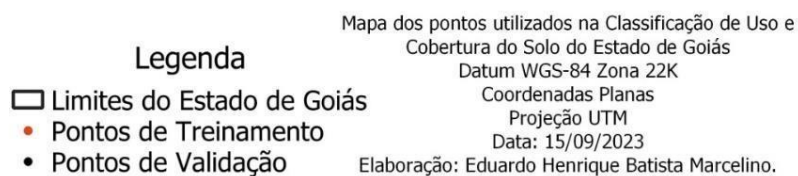
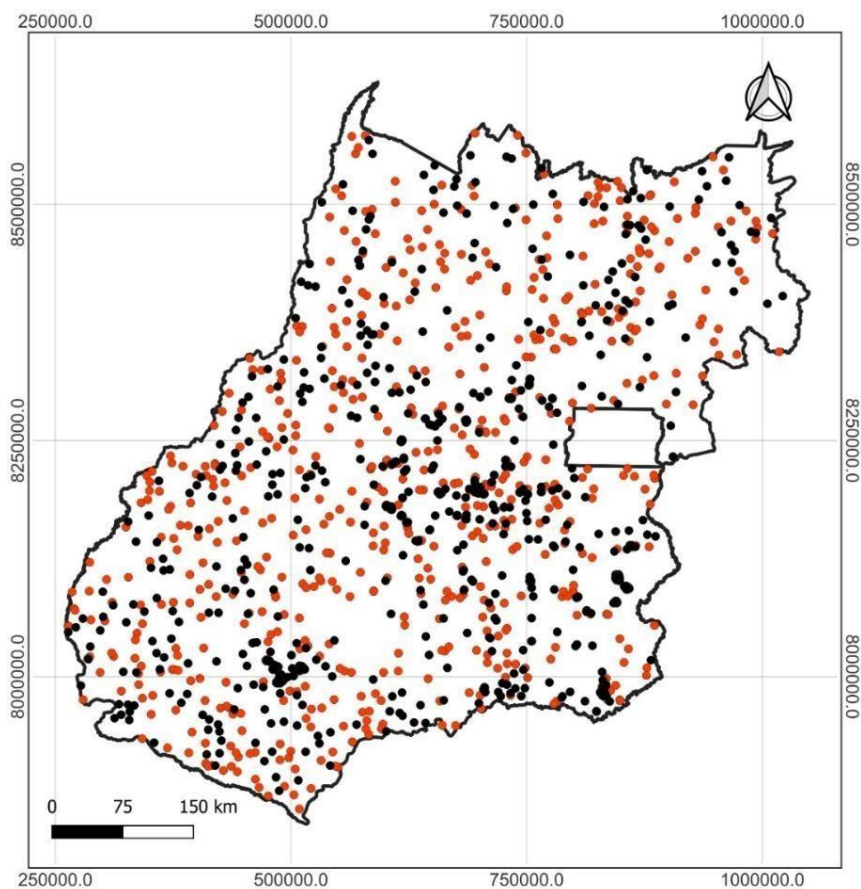
A utilização dos pontos de validação do MapBiomias, resultado do trabalho realizado pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (LAPIG-UFG), como descrito no trabalho de Parente et al. (2021), não apenas oferece uma perspectiva abrangente em termos geográficos, mas também aborda a diversidade dos tipos de cobertura do solo. Essa estratégia, ao se apoiar em uma plataforma consolidada, contribui para a objetividade e confiabilidade na comparação entre áreas, garantindo uma base de dados consistente.

3.4 Processamento dos dados

A classificação supervisionada requer a inserção de dados pré-classificados para o treinamento. Para isto, foram selecionadas 2644 amostras de coordenadas geográficas, separadas entre 8 classes de cobertura da terra, de acordo com a identificação visual presente.

Buscou-se distribuir aleatoriamente os pontos em toda a área de estudo, de acordo com a fisionomia da vegetação observada. O conjunto de pontos de cada classe (Figura 1) foi aleatorizado e divididos em dois conjuntos independentes, sendo um de treinamento (70%) e outro de teste (30%).

Figura 1 – Pontos de Treinamento e Validação.



Fonte: resultados da pesquisa (2023).

Todo processamento de dados do projeto foi realizado na plataforma de computação em nuvem Google Earth Engine (GEE), desde a seleção de imagens até a avaliação da classificação, conforme instruído por Gorelick et al. (2017). Os dados de treinamento foram introduzidos na plataforma manualmente, cada classe foi inserida como uma camada de múltiplos pontos. Para

identificar a classe pertinente a cada ponto, utilizou-se o método de classificação supervisionada Random Forest, baseado em aprendizado de máquina, segundo o qual, a partir das características dos dados, as árvores de decisão estabelecem parâmetros de seleção que classificam os pontos da imagem.

O GEE ainda permite a configuração de propriedades do classificador, como número de árvores de decisão, variáveis por divisão e número de nós. Foram utilizadas as seguintes configurações: 50 árvores de decisão, sendo que o padrão são 10; variáveis por divisão: a raiz quadrada do número de variáveis por divisão, padrão e número de nós sem limite, também seguindo o padrão.

3.5 Pós-processamento dos dados

A tarefa de pós-processamento foi realizada usando ferramentas de filtro majoritário e peneira para reduzir ruído e pixels isolados (PASSY; THÉRY, 2018). A avaliação da precisão foi, então, implementada para determinar a exatidão dos resultados da classificação.

A avaliação foi realizada usando o plugin AcATAMa (LLANO, 2019), para produzir a matriz de confusão, precisão geral e precisão kappa. O plugin AcATAMa oferece opções completas para avaliação de precisão de mapas temáticos, inclusive oferece um método de amostragem aleatória estratificada para melhorar a precisão e as estimativas de área (OLOFSSON et al., 2014).

3.6 Quantificação de Área

A abordagem adotada para mensurar a área de plantio de eucalipto por mesorregião em Goiás envolveu várias etapas executadas no software QGIS 3.22. Inicialmente, as áreas de plantio foram convertidas para formatos vetoriais, tornando-as mais adequadas para análise no QGIS. Em seguida, as áreas vetorizadas foram transformadas em shapes, seguido por um processo vetorial de dissolução, que buscou unificar as áreas de plantio e eliminar eventuais sobreposições.

Posteriormente, o cálculo da área total das regiões unificadas foi realizado. A ferramenta "Calculadora de Campo" na tabela de atributos foi empregada para obter informações sobre a extensão das áreas de plantio de eucalipto. Em seguida, as áreas unificadas foram recortadas de acordo com as mesorregiões de Goiás. Esse procedimento permitiu a obtenção de áreas de

plantio específicas para cada unidade de planejamento, oferecendo uma visão detalhada da distribuição espacial do cultivo de eucalipto em cada mesorregião.

3.7 Análise de Substituição

A análise de substituição foi conduzida por meio de uma metodologia abrangente que envolveu a utilização de áreas de eucalipto vetorizadas e dissolvidas. O processo foi iniciado com a execução de uma operação de interseção entre essas áreas e os mapas de uso e cobertura do solo do MapBiomias. Essa interseção permitiu identificar o uso e a cobertura do solo das áreas antes do plantio de eucalipto, estendendo-se ao longo de diversas operações vetoriais realizadas, retroativamente, até o ano de 2014. Ao realizar esse mapeamento temporal, foi possível, então, rastrear a evolução e a conversão das áreas de eucalipto entre 2014 e 2023, o que permitiu uma análise das mudanças ocorridas ao longo do tempo, destacando a dinâmica de substituição das paisagens e evidenciando a transformação das áreas em questão.

3.8 Fragilidade Ambiental

A avaliação da fragilidade ambiental neste estudo incorpora abordagens metodológicas de Ross (1994) e Crepani et al. (2001). Dado que a metodologia de Ross (1994) categoriza em cinco níveis hierárquicos, variando de 1 a 5, enquanto a de Crepani avalia a vulnerabilidade ambiental em uma escala de 1 a 3, foi necessário normalizar os intervalos de fragilidade usados por Crepani et al. (2001) e recategorizar para os cinco níveis de fragilidade delineados por Ross (1994). Assim, dados referentes aos aspectos pedológicos, geológicos, relevo e pluviométricos da área de estudo foram indispensáveis para a obtenção da fragilidade ambiental.

3.7.1 Fragilidade do solo

Os dados referentes às propriedades do solo foram obtidos a partir do Mapa de Solos de Goiás, elaborado pelo Instituto Mauro Borges e disponibilizado pela SIEG-GO. A análise da fragilidade pedológica da bacia seguiu os princípios estabelecidos por Ross (1994), levando em consideração o tipo de solo presente na área de estudo. Nesse sentido, foram avaliadas as características de textura, estrutura, coesão das partículas e profundidade dos horizontes de cada tipo de solo, a fim de classificar sua resistência.

Neste contexto, os Latossolos destacam-se por apresentar uma baixa suscetibilidade à erosão quando comparados aos Cambissolos e Neossolos. Esses últimos, por sua vez, são considerados solos com um maior grau de fragilidade, conforme descrito por Manfré et al. (2013). Essa classificação é fundamental para compreender a vulnerabilidade dos solos da região à erosão e contribui para o desenvolvimento de estratégias de manejo e conservação adequadas.

3.7.2 Fragilidade da geologia

Os dados referentes às propriedades da geologia foram obtidos a partir da base de dados da SIEG-GO, elaborado pelo Instituto Mauro Borges. A fragilidade geológica está intrinsecamente ligada ao nível de coesão dos minerais constituintes das rochas, determinando assim a capacidade de resistência destas à denudação, que compreende o intemperismo e a erosão (CREPANI et al., 2001). Como exemplo, as rochas compostas principalmente por quartzitos, devido à menor solubilidade de seus minerais, são classificadas como altamente resistentes ao intemperismo químico (WRAY; SAURO, 2017).

Em contrapartida, as rochas carbonáticas, como calcário, dolomita e evaporitos, apresentam uma maior vulnerabilidade ao intemperismo devido à sua propensão à dissolução em água (JURAČIĆ et al., 2009). Essa distinção na resposta ao intemperismo químico entre diferentes tipos de rochas é importante para compreender a estabilidade geológica de uma região e tem implicações significativas na avaliação da suscetibilidade dessas formações rochosas à erosão e outros processos de degradação ambiental.

3.7.3 Fragilidade do relevo

Os dados referentes às propriedades do relevo foram obtidos a partir da base de dados da SIEG-GO, elaborado pelo Instituto Mauro Borges. Esse índice realiza uma análise morfométrica do relevo, focando no grau de entalhamento dos vales e na dimensão média interfluvial. Ele é aplicado em diversas situações, como no mapeamento geomorfológico, na relação entre morfogênese e pedogênese, e em estudos de vulnerabilidade ambiental (CREPANI et al., 2001; GUIMARÃES et al., 2017).

3.7.4 Fragilidade da precipitação

Os dados referentes às propriedades da precipitação foram obtidos a partir da base de dados do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas (ANA, 2023).

Após obter o mapa de pluviosidade média anual espacializado, procedeu-se à sua divisão pela duração do período chuvoso, expressa como o número médio de meses. Esse processo resultou nos valores de lâmina precipitada mensal (mm/mês) para a área de estudo, denominados por Crepani et al. (2001) como "intensidade pluviométrica". Conforme definido por esses autores, maiores valores de intensidade pluviométrica indicam uma maior erosividade da chuva e uma influência mais acentuada do clima nos processos morfodinâmicos.

Por meio dessa abordagem, foi possível classificar e gerar o mapa de fragilidade da precipitação, seguindo os pressupostos estabelecidos por Crepani et al. (2001). Esse mapeamento proporciona insights sobre a distribuição espacial e a intensidade das chuvas na região de estudo, sendo fundamental para avaliar a suscetibilidade a processos erosivos e para embasar estratégias de manejo e conservação do solo.

3.7.5 Fragilidade do uso e ocupação do solo

Os dados referentes às propriedades do uso e ocupação de solo foram obtidos a partir da classificação de uso e ocupação do solo mencionado anteriormente. No âmbito deste estudo, adotou-se uma classificação de alta fragilidade para áreas urbanas e com solo exposto, atribuindo esse status devido à menor proteção do solo decorrente da ausência de cobertura vegetal. Por outro lado, as áreas de floresta nativa e plantada foram classificadas como de fragilidade muito baixa e baixa, respectivamente. Segundo Tonello et al. (2014), as áreas de florestas naturais exibem baixa fragilidade, principalmente devido à maior interceptação das chuvas e à capacidade de retenção de água nesse tipo de formação vegetal.

Em contrapartida, devido à predominância de cultivos de ciclos longos, como citros e café, cultivados geralmente em nível, considerou-se esta classe de cobertura como de média fragilidade (3). As áreas de pastagem e agricultura anual foram categorizadas como de fragilidade alta, devido ao grau de degradação observado e à limitada proteção do solo (ROSS, 1994). Por fim, as áreas ocupadas por corpos d'água foram associadas a uma fragilidade nula, conforme preconizado por Cruz et al. (2017). Essas classificações são cruciais para compreender a vulnerabilidade de diferentes tipos de cobertura do solo a processos erosivos e para orientar estratégias de manejo e conservação.

3.7.6 Aplicação da análise multicritério para o mapeamento da fragilidade

Obtidos os mapas de fragilidade para cada fator, a análise multicritério foi utilizada para gerar o mapeamento da fragilidade potencial e ambiental, por intermédio do software Qgis 3.22.

As ferramentas Analytic Hierarchy Process (AHP) e o modelo de Combinação Linear Ponderada (WLC) foram empregados para apoiar as decisões na determinação dos níveis de fragilidade. O AHP possibilitou a criação de uma hierarquia entre as relações existentes, permitindo o cálculo dos pesos para cada fator analisado e a atribuição de um nível de consistência para as comparações (PINESE JÚNIOR; RODRIGUES, 2012). Na matriz de comparação pareada do método AHP, os fatores foram avaliados conforme sua importância, resultando nos pesos calculados para cada um deles. No contexto da análise de fragilidade potencial, foi atribuído o mesmo nível de relevância (1) para os fatores intrínsecos da área, tais como pedologia, geologia, dissecação do relevo e precipitação, resultando, inicialmente, em pesos iguais de 0,25 para cada um desses fatores.

Na análise de fragilidade ambiental, foi atribuída uma importância superior ao uso e cobertura da terra em comparação com os fatores naturais, mantendo esses últimos com a mesma relevância entre si. Assim, o modelo determinou um peso de 0,4286 para o uso e ocupação da terra e 0,1429 para os fatores intrínsecos, conforme proposto por Manfré et al. (2013). A inconsistência para os pesos derivados do AHP foi de 0,0, indicando uma excelente consistência entre os fatores e os pesos adotados, permitindo a utilização confiável desses resultados na análise de fragilidade ambiental.

Após a conclusão da análise multicritério, os mapas de fragilidade potencial e fragilidade ambiental foram reclassificados em cinco intervalos de classes iguais. Em seguida, as áreas correspondentes a cada intervalo foram calculadas. Dessa maneira, as regiões associadas ao intervalo de menor adequabilidade, próximo a 255, foram designadas como de fragilidade muito alta, enquanto as áreas vinculadas ao menor intervalo, próximo a zero, foram classificadas como de fragilidade muito baixa. Esse processo simplifica a interpretação dos resultados, proporcionando uma visualização clara das áreas com diferentes níveis de fragilidade potencial e ambiental.

3.8 Análise econômica

A análise econômica foi fundamentada no Valor Bruto de Produção (VBP), um indicador que representa o valor total da produção de bens e serviços em um setor, região ou país, sem considerar os custos de produção. No contexto agrícola, especialmente no agronegócio, o VBP é empregado para avaliar a contribuição econômica da produção agrícola em uma determinada área, calculando-se a multiplicação da quantidade produzida de cada produto pelo seu preço de mercado (IBGE, 2023).

Assim, durante o período compreendido entre os anos de 2023 a 2014, foi realizada a análise econômica comparativa entre o Valor Bruto da Produção (VBP) proveniente do uso anterior e o atual (Floresta de eucalipto), o qual foi calculado com base na produção agrícola e pecuária, bem como nos preços recebidos pelos produtores. Esses dados foram obtidos a partir dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) através do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA).

Para estimar o impacto econômico da silvicultura, foi utilizado o volume comercializado em conjunto com os dados do Instituto para o fortalecimento da silvicultura no estado de Goiás (IFAG, 2023), que mensalmente divulga boletins de mercado de silvicultura no estado. Com base nesses dados, o preço médio foi calculado, resultando em um Valor Bruto de Produção (VBP) estimado para a silvicultura em Goiás.

Para calcular o Valor Bruto da Produção (VBP) da pecuária em Goiás, utilizaram-se os valores do VBP de bovinos e do leite, os quais foram somados, abrangendo tanto a pecuária de corte quanto a de leite no estado. Estes dados foram extraídos da Pesquisa da Pecuária Municipal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022). Em seguida, para calcular o VBP por hectare (VBP/ha), o valor total do VBP da pecuária foi dividido pela área total de pastagens existentes em Goiás. Essa abordagem permite uma avaliação mais precisa do valor econômico gerado pela atividade pecuária em relação à área utilizada para pastagens no estado.

Para a classe de vegetação nativa, o cálculo do Valor Bruto de Produção (VBP) foi fundamentado nos dados de Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (IBGE, 2023). Esses dados abrangem o valor da produção de produtos oriundos do extrativismo no estado de Goiás. Para o ano de 2023, é importante observar que os dados de Produção Extrativista do IBGE não foram disponibilizados, o que resulta na ausência desse dado para esse período.

Para calcular o Valor Bruto de Produção (VBP) proporcional às áreas substituídas, foram consideradas diferentes categorias de uso da terra: pastagem, agricultura, vegetação nativa e silvicultura. O efeito econômico de substituição (EES) foi calculado, então, como o custo de oportunidade em relação à substituição por eucalipto, resultando em ganhos, quando positivo e perdas, quando negativo, conforme a equação 2:

$$EES = VBPe (Ae) - VBPcx (Acx) \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

VBP = valor bruto da produção

A= área cultivada

e=eucalipto

cx=cultura x

Para calcular o Valor Bruto de Produção (VBP) por hectare, foi adotada uma abordagem que envolveu a obtenção da média dos últimos quatro anos do VBP total, corrigido pelo Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna (IGP-DI), e sua subsequente divisão pela área total. Esta área total foi determinada por meio de uma classificação supervisionada realizada previamente.

4. Resultados e Discussões

4.1 Validação da classificação

A classificação realizada obteve um índice Kappa de 92%, uma acurácia global de 90% e desvio padrão de 0.01112 o que demonstra o grau de confiabilidade na categorização do uso e cobertura do solo no Estado de Goiás (Tabela 1).

A qualidade da classificação, utilizando o resultado do índice Kappa, foi aquela proposta por Landis e Koch (1977), para os quais um valor Kappa acima de 80% é classificado como excelente, esse resultado revela a precisão e a confiabilidade do processo de classificação, indicando que as áreas de plantio foram identificadas com grande acurácia.

A precisão (ou acurácia) do usuário e do produtor são métricas comumente utilizadas em contextos de classificação, especialmente em tarefas relacionadas à avaliação de sistemas de reconhecimento ou detecção. Essas métricas são importantes para entender o desempenho de um modelo em situações práticas.

Acurácia do usuário, refere-se à proporção de exemplos relevantes para uma classe que são corretamente identificados pelo modelo, ou seja, quanto do que deveria ser capturado foi realmente capturado. Já a acurácia do produtor, refere-se à proporção de exemplos identificados pelo modelo como pertencentes a uma classe que realmente são relevantes para essa classe, isto é, quanto do que foi capturado é realmente relevante.

Tabela 1 – validação e acurácia da classificação.

Classes	Outros	Água	Formação florestal	Lavoura	Pastagem	Urbano	Formação savânica	Eucalipto	total	Acc. Usuário
Outros	30	0	0	0	1	0	0	0	31	96,774
Água	1	4	1	0	0	0	0	0	6	66,667
Formação florestal	0	0	72	0	0	0	0	0	72	100
Lavoura	0	0	0	77	2	0	0	1	80	96,25
Pastagem	0	0	1	4	191	0	1	3	200	95,5
Urbano	0	0	0	0	1	1	1	1	4	25,0
Formação savânica	0	0	1	0	1	0	18	0	20	90,0
Eucalipto	11	0	45	3	30	1	8	283	381	74,278
total	42	4	120	84	226	2	28	288	794	-
Acc. (Produtor)	90,786	100	82,523	88,187	94,123	92,32	59,933	91,121	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2 Classificação de uso e cobertura do solo

O mapa de classificação de uso e cobertura do solo (Figura 2) revela a complexidade e diversidade das características da paisagem de uma determinada região. Dentre as categorias estabelecidas, a classe "Água" representa as extensões cobertas por corpos d'água, como rios e lagos, desempenhando um papel importante no contexto ambiental.

A presença significativa de plantações de eucalipto é mapeada na categoria "Eucalipto", indicando áreas dedicadas ao cultivo extensivo dessa espécie arbórea. Já a "Formação Florestal"

abrange regiões caracterizadas por florestas naturais, exibindo uma rica diversidade de espécies arbóreas autóctones.

Nas áreas destinadas à agricultura intensiva, representadas pela categoria "Lavoura", diversas culturas prosperam, refletindo a atividade agrícola predominante. A categoria "Pastagem" destaca terras utilizadas para a criação de animais, predominantemente cobertas por gramíneas e plantas forrageiras.

A expansão urbana é evidenciada pela categoria "Urbanização", incluindo construções, estradas e demais infraestruturas associadas às atividades humanas. Em contraste, a presença de vegetação esparsa e gramíneas define a categoria "Formação Savânica".

Por fim, a classe "Outros" abrange áreas cuja cobertura do solo não se alinha claramente com as categorias predefinidas, fornecendo um espaço flexível para a inclusão de características singulares.

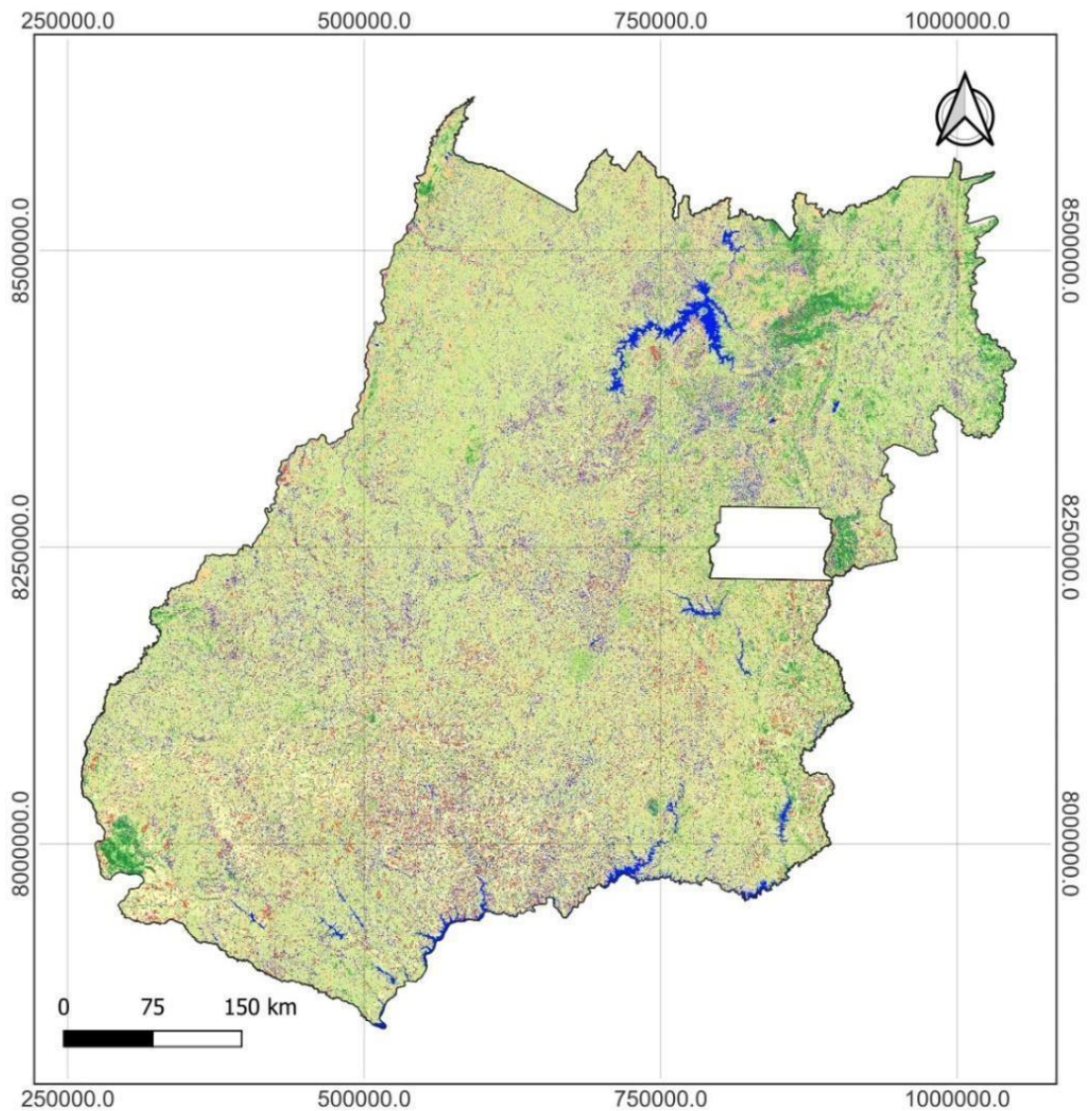
Entre as classes identificadas, a pastagem emergiu como a categoria dominante, abrangendo 44% da área total. Essa predominância ressalta a significativa presença de áreas destinadas à pecuária e atividades relacionadas.

Logo em seguida, observamos a presença de áreas destinadas à Agricultura, totalizando 20,5% da paisagem. Essa parcela significativa indica a importância econômica da agricultura na região, evidenciando práticas como o cultivo de cereais, grãos e outros produtos agrícolas.

A formação florestal também desempenha um papel significativo, cobrindo 13,9% da área total, da mesma forma, a formação savânica, abrangendo 8,5% da área total. Essas áreas desempenham um papel vital na manutenção do equilíbrio ambiental, contribuindo para a biodiversidade e serviços ecossistêmicos essenciais.

A classe de eucalipto figura como a categoria com a menor proporção em relação à área total do estado, representando apenas 0,4%. Esse dado indica que, apesar da presença do eucalipto, sua extensão é relativamente limitada em comparação com outras formas de uso do solo.

Figura 2 – Classificação de uso e cobertura do solo do Estado de Goiás



Legenda

Classificação	
■	Água
■	Eucalipto
■	Formação florestal
■	Lavoura
■	Pastagem
■	Urbanização
■	Formação savânica
■	Outros

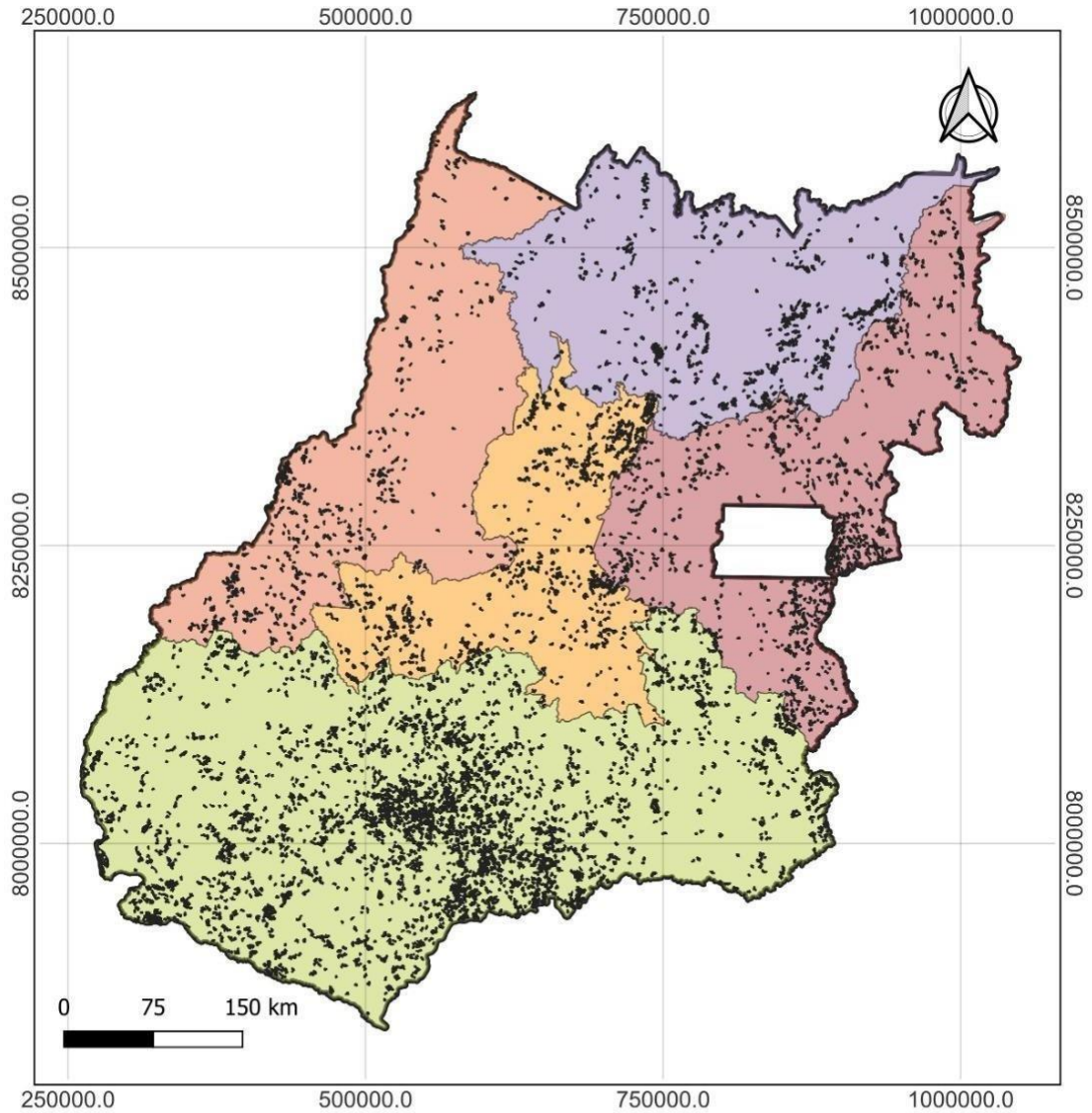
Mapa de Classificação de Uso e Cobertura do Solo do
Estado de Goiás
Datum WGS-84 Zona 22K
Coordenadas Planas
Projeção UTM
Data: 15/09/2023
Elaboração: Eduardo Henrique Batista Marcelino.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.3 Classificação de plantios de eucalipto

Após a classificação, foi estimada a presença de aproximadamente 138,9 mil hectares de plantações de eucalipto no estado de Goiás (Figura 3).

Figura 3 – Classificação dos plantios de eucalipto no Estado de Goiás



Legenda

- Limites do Estado de Goiás
- Leste Goiano
- Noroeste Goiano
- Norte Goiano
- Sul Goiano
- Centro Goiano
- Áreas de Eucalipto

Mapa das Áreas de Eucalipto no Estado de Goiás

Datum WGS-84 Zona 22K

Coordenadas Planas

Projeção UTM

Data: 15/09/2023

Elaboração: Eduardo Henrique Batista Marcelino.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Foi observado que a preponderante proporção destes plantios de eucalipto encontra-se estrategicamente distribuídas nas mesorregiões Sul, Leste, Centro Norte e Noroeste do estado de Goiás, perfazendo, respectivamente, uma parcela de 55% na mesorregião Sul, 16% na mesorregião Leste, 12% na mesorregião Centro, 9% na mesorregião Norte e 8% na mesorregião Noroeste.

Adicionalmente, foi observado que 76,9% dos referidos plantios possuem áreas inferiores a 10 hectares, ao passo que 14,9% das plantações apresentam área entre 10 e 25 hectares. Por sua vez, 4,6% dos cultivos detém áreas entre 25 e 50 hectares, enquanto 2,14% ocupam extensões territoriais entre 50 e 100 hectares. Assim 1,43% dos plantios apresentaram dimensões superiores a 100 hectares, atingindo, até mesmo, a extensão de 5000 hectares, figurando como a maior área de plantio de eucalipto identificada nessa classificação.

Essa distribuição heterogênea reflete a importância de se considerar as características específicas de cada região de Goiás ao planejar e monitorar o desenvolvimento da silvicultura no Estado.

Verifica-se uma variação no valor da área de plantações de eucalipto em Goiás no ano de 2023 em comparação com os dados reportados pela IBÁ em 2021. A discrepância de 17% entre os valores mencionados pode estar relacionada ao abate de áreas não detectáveis pelo sistema de classificação utilizado.

Esta discrepância é corroborada por estudos anteriores, como o de Cabral (2017), que apontou uma divergência de 12% entre os dados da IBÁ e do TerraClass em 2013. A resolução espacial dos sensores empregados e a escolha das faixas espectrais também influenciam na interpretação dos dados, sendo que sensores com menor resolução espacial e faixas espectrais mais limitadas tendem a facilitar a interpretação e aumentar a clareza das distinções entre os alvos.

Essas conclusões são consistentes com achados anteriores, como os de Carvalho (2020), que evidenciou a importância da escolha dos sensores e técnicas de classificação na discriminação de remanescentes florestais de cultivos de eucalipto.

4.4 Análise de substituição e Fragilidade Ambiental

A composição atual, conforme evidenciado na Tabela 2, revela que dos 138,9 mil hectares de eucalipto identificados em 2023, as áreas anteriormente destinadas a pastagem, lavoura, vegetação nativa e silvicultura apresentavam distintas alocações. Dentre estas, a

agricultura correspondia com 74 mil hectares, a pastagem representava 36 mil hectares, a vegetação nativa totalizava 19,2 mil hectares, e 9,7 mil hectares ainda subsistem como áreas dedicadas ao eucalipto.

Tabela 2 – Análise de substituição.

Usos Anteriores	Área (ha)	Proporção (%)
Agricultura	74.027	53,28
Pastagem	35.995	25,90
Vegetação Nativa	19.149,6	13,78
Eucalipto	9.779,5	7,04
Total	138.951,1	100,0

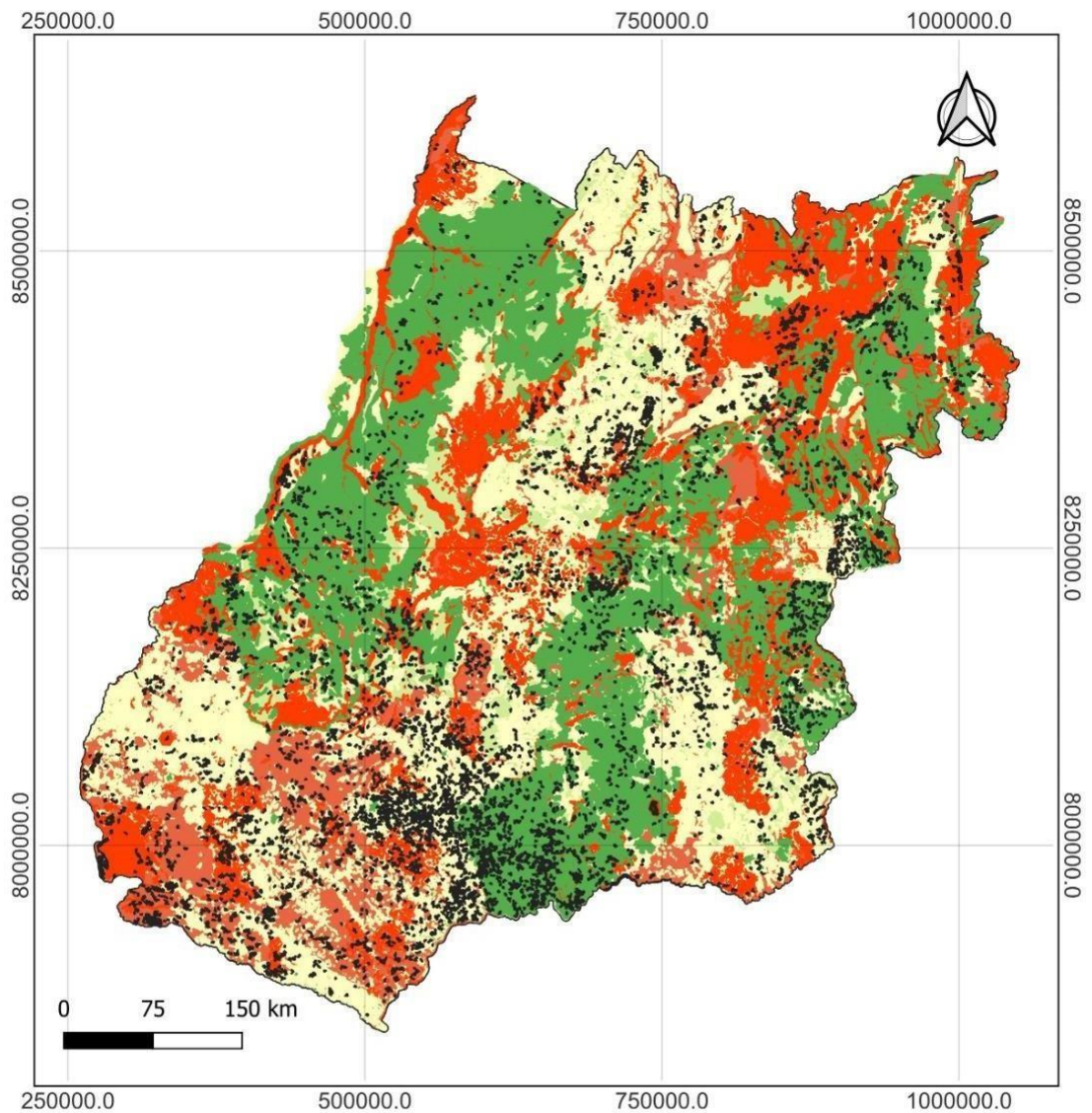
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A classificação das áreas de eucalipto revelou uma distribuição diversificada em termos de fragilidade ambiental (Figura 4). A maior proporção dessas áreas foi identificada na categoria de classe de fragilidade ambiental alta, representando 41,7% do total. Essa constatação sugere que uma parcela significativa dos plantios de eucalipto está localizada em regiões que são classificadas como frágeis, apresentando um nível alto de sensibilidade ambiental. Em segundo lugar, as áreas classificadas como de baixo grau de fragilidade compreendem 27,7% do total identificado, indicando uma presença substancial em ambientes menos suscetíveis a impactos ambientais.

Ademais, é interessante observar que uma porção considerável das áreas de eucalipto identificadas se apresenta em níveis variados de fragilidade ambiental. As classes de muito baixo e muito alto fragilidade representam, respectivamente, 2,7% e 2,6% do total, sugerindo uma distribuição pouco diversificada que abrange desde áreas com uma menor suscetibilidade ambiental até aquelas consideradas de alto risco. A classe de média fragilidade, representando 25,1%, desempenha um papel significativo, apontando para a presença de plantios de eucalipto em áreas que, em termos relativos, são menos sensíveis a impactos ambientais.

Observa-se que a predominância da localização de plantações de eucalipto em solos de alta aptidão agrícola evidencia uma expansão comercial para essas áreas, potencialmente competindo com a produção de alimentos. O notável avanço em direção a áreas anteriormente destinadas à lavoura e pastagens ressalta o potencial da atividade no estado, uma vez que os plantios florestais passam a disputar terras com histórico de maior retorno financeiro. Essa tendência sugere um aumento potencial na oportunidade de integração entre silvicultura e agricultura, visto que ambas as atividades tenderiam a ocupar o mesmo espaço, conforme observado por De Oliveira Araújo e Barreira (2024).

Figura 4 – Mapa de Fragilidade Ambiental no Estado de Goiás



Legenda

- Muito Baixa
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta
- Áreas de Eucalipto

Mapa de Fragilidade Ambiental no Estado de Goiás
 Datum WGS-84 Zona 22K
 Coordenadas Planas
 Projeção UTM
 Data: 15/09/2023
 Elaboração: Eduardo Henrique Batista Marcelino.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O mapeamento da fragilidade potencial do solo é uma ferramenta fundamental para compreender o potencial de erodibilidade do solo em um determinado território, levando em consideração suas características físicas e os aspectos climáticos, este mapeamento revela que uma parcela significativa da área possui uma fragilidade potencial classificada como baixa, correspondendo a aproximadamente 27,7% da área analisada.

A área de estudo apresenta uma distribuição de fragilidade potencial variada, onde a classe de fragilidade potencial muito baixa abrange 2,7% do território. Essa classe está associada a um relevo suave e planícies, com inclinações abaixo de 3%, caracterizadas por solos profundos e bem drenados, predominantemente Latossolos e Argissolos.

A baixa fragilidade potencial compreende 27,7% da área, caracterizada por inclinações até 8% e presença de Latossolos e Argissolos. Estes fatores, isoladamente, indicam uma baixa vulnerabilidade à erosão.

A fragilidade potencial média corresponde a 25,1% da área de estudo, com inclinações suaves (até 20%) e presença de Argissolos Vermelho Eutróficos, caracterizados por sua alta permeabilidade e susceptibilidade a processos erosivos, conforme evidenciado por Vale Junior et al. (2009), Castro et al. (2011) e Cunha (2013).

A alta fragilidade potencial abrange a maior parte da área, correspondendo a 41,7%, com predominância de Neossolos Litólicos Eutróficos e Argissolos Vermelho Amarelo Distróficos. Essas áreas apresentam inclinações entre 20 e 45% e prioridade máxima de conservação devido às características do relevo e do solo, exigindo atenção especial.

As áreas classificadas como de muito alta fragilidade potencial, ocupando 2,6% da área total, são encontradas em encostas de morros, com inclinações superiores a 45%, predominando o Neossolo Litólico Eutrófico. Estas áreas representam o maior risco de erosão devido à combinação de fatores topográficos e características do solo, requerendo medidas de conservação mais rigorosas e intervenções específicas para evitar a degradação ambiental.

A fragilidade potencial do eucalipto constitui uma consideração primordial no âmbito de sua produção e plantio. A fragilidade potencial, neste contexto, refere-se à susceptibilidade de um ecossistema específico a sofrer danos ou degradação devido a intervenções humanas ou fenômenos naturais. No contexto do cultivo de eucalipto, uma série de variáveis podem influenciar a fragilidade potencial, englobando características edáficas, topográficas, climáticas e práticas de manejo empregadas.

É de suma importância ressaltar que o cultivo de eucalipto não ocasiona alterações nos fatores intrínsecos à fragilidade ambiental. Entretanto, é pertinente mencionar que o cultivo de eucalipto pode exercer impactos sobre a fragilidade potencial do ambiente de outras formas, como por exemplo a redução da velocidade de impacto da gota de água, resultado da energia cinética da chuva (caracterizada pelo efeito splash ou salpico) que depende do tamanho e velocidade das gotas das chuvas é reduzido significativamente quando atingem o solo, melhorando a infiltração e retardando o movimento de escoamento (WANG et al., 2013; CUNHA, 2013).

4.4.1 Fragilidade por categoria substituída

A análise da fragilidade ambiental na classe de pastagem, abrangendo uma área total de 36 mil hectares, revela uma diversidade significativa nos níveis de fragilidade. A distribuição desses níveis é detalhada na tabela 3.

Tabela 3 – Análise de fragilidade da classe pastagem.

Pastagem	Área (ha)	Proporção (%)
Muito baixo	830,7	2,3
Baixo	12.636,1	35,1
Médio	5.176,3	14,4
Alto	15.713,4	43,6
Muito alto	1.638,3	4,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A fragilidade ambiental com a maior proporção da área de pastagem sendo classificada como 'Alta Fragilidade', representando 43,6% do total identificado. As áreas de 'Baixo' fragilidade também são significativas, cobrindo 35,1% da extensão total. A presença de 'Muito Baixo' e 'Muito Alto' indica extremos relativamente menos comuns, abrangendo 2,3% e 4,6%, respectivamente.

Resultado semelhante foi encontrado por Pinese Júnior e Rodrigues (2012) na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG), em que foi destacado que áreas de pastagens favorecem a maior vulnerabilidade ao solo frente aos efeitos da erosão, pois as pastagens reduzem a infiltração do solo, propiciando o escoamento superficial.

A substituição dessas áreas pelo plantio de eucalipto evidencia ganho ecológico relacionados à redução da fragilidade potencial, uma vez que os plantios de eucalipto podem promover maior estabilidade dos solos frente aos processos erosivos.

A avaliação da fragilidade ambiental na classe de agricultura, abrangendo uma extensão total de 74 mil hectares, destaca uma diversidade notável nos níveis de fragilidade. A distribuição desses níveis é detalhada na tabela 4.

Tabela 4 – Análise de fragilidade da classe agricultura.

Agricultura	Área (ha)	Proporção (%)
Muito baixo	2.654,2	3,6
Baixo	12.451,3	16,8
Médio	32.536,9	44,0
Alto	25.210,8	34,0
Muito alto	1.173,6	1,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A maior parte da área de agricultura é caracterizada por uma 'Média Fragilidade', compreendendo 44,0% do território. Além disso, áreas de 'Baixa' e 'Alta' fragilidade contribuem significativamente, ocupando 16,8% e 34,0%, respectivamente.

Segundo Tricart (1977) e Melo et al. (2014), a cobertura vegetal é um dos principais - senão o mais relevante - fatores de proteção e estabilidade dos processos morfodinâmicos do solo, tendo capacidade de frear as ações de degradação do solo. Assim, a presença ou ausência de cobertura vegetal alteram, em muito, a conformação das classes de vulnerabilidade do solo.

A principal diferencial entre os mapas de fragilidade potencial e fragilidade emergentes, se dá em solos ocupados com culturas anuais, pois a exposição do solo sem cobertura vegetal propicia a degradação do mesmo por processo de erosão laminar. Resultado semelhante foi encontrado por Pinese Júnior e Rodrigues (2012) na determinação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG), em que áreas com solos expostos ou preparados para o plantio mostraram-se mais favoráveis à fragilidade do ambiente. Os resultados para esta categoria evidenciam também, um ganho ecológico em relação à redução da vulnerabilidade dos solos aos processos erosivos, sobretudo em áreas de fragilidade mais elevada. Entretanto, a substituição de cultivos alimentares, em locais de média e baixas fragilidades, pode ser questionada sob a perspectiva de segurança alimentar.

A análise da fragilidade ambiental na classe de vegetação nativa, abrangendo uma área total de 19,2 mil hectares, revela nuances distintas nos níveis de fragilidade. A distribuição desses níveis é detalhada na tabela 5.

Tabela 5 – Análise de fragilidade da classe Vegetação nativa.

Vegetação nativa	Área (ha)	Proporção (%)
Muito baixo	397,1	2,1
Baixo	4.502,5	23,5
Médio	5.179,5	27,0

Alto	8.397,6	43,9
Muito alto	672,7	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A vegetação nativa apresenta maior parte da área é caracterizada por uma 'Alta Fragilidade', ocupando 43,9% do território. Além disso, áreas de 'Baixa' e 'Média' fragilidade contribuem significativamente, abrangendo 23,5% e 27,0%, respectivamente.

As áreas designadas como de alta fragilidade potencial, estão associadas principalmente a Neossolos Litólicos Eutróficos e Argissolos Vermelho Amarelo Distróficos. Esses solos são mais suscetíveis à erosão devido a suas características físicas e químicas, como baixa capacidade de retenção de água e maior suscetibilidade ao intemperismo. Essas áreas apresentam o maior risco de erosão devido à combinação de fatores topográficos e características do solo, exigindo medidas de conservação mais rigorosas e intervenções específicas para proteger o solo e evitar a degradação ambiental.

A preservação da vegetação natural em áreas de Neossolos localizadas nas encostas de morros residuais, onde a cobertura vegetal desempenha um papel importante na proteção e estabilidade do solo. A presença da vegetação nestas áreas parece ter contribuído para a redução da vulnerabilidade do solo ao longo do período analisado, conforme observado por Tricart (1977) e Melo et al. (2014). A vegetação atua como um fator de proteção contra processos erosivos, ajudando a evitar a degradação do solo.

A avaliação da fragilidade ambiental na classe de Eucaliptocultura, abrangendo uma área total de 9,7 mil hectares, destaca padrões distintos nos níveis de fragilidade. A distribuição desses níveis é detalhada na tabela 6.

Tabela 6 – Análise de fragilidade da classe Eucaliptocultura.

Silvicultura	Área (ha)	Proporção (%)
Muito baixo	608,9	6,2
Baixo	2.674,2	27,1
Médio	35,20	36,0
Alto	3.003,1	30,7
Muito alto	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A silvicultura apresenta uma distribuição variada na fragilidade ambiental, desde 'Muito Baixo' até 'Alta'. A maior parcela da área é caracterizada por uma 'Média Fragilidade', cobrindo 36,0% do território. Adicionalmente, áreas de 'Baixa' fragilidade também são significativas,

com uma proporção de 27,1%. A presença de áreas com 'Muito Baixo' e 'Alta' fragilidade, representando 6,2% e 30,7%, respectivamente.

Média fragilidade potencial é caracterizada pela presença de declividades que variam de 8 a 20% e pela predominância de Argissolos Vermelho Eutróficos. Essas áreas indicam um grau intermediário de vulnerabilidade do solo à erosão, sugerindo a necessidade de medidas de manejo específicas para conservação do solo.

Áreas ocupadas com silviculturas, reflete uma preocupação crescente com a vulnerabilidade do solo, uma vez que tendem a reduzir a infiltração de água no solo, aumentando o escoamento superficial e, conseqüentemente, a erosão. Essa conclusão é consistente com os achados de estudos anteriores, como o de Pinese Júnior e Rodrigues (2012), que destacaram a maior vulnerabilidade ao solo em áreas de pastagem devido aos efeitos da erosão.

4.5 Análise Econômica

A Tabela 7 representa o Valor Bruto da Produção (VBP) de diferentes atividades produtivas ao longo de um período de dez anos, de 2014 a 2023. Durante esse período, a agricultura apresentou uma tendência geral de crescimento, com um aumento constante no VBP, atingindo seu pico em 2022, seguido por uma leve queda em 2023. Em contraste, o setor pecuário teve um crescimento mais moderado, com flutuações ao longo dos anos. Após um aumento inicial em 2015, houve uma ligeira queda em 2016, seguida por um crescimento gradual até 2021, antes de declinar novamente em 2022 e 2023.

A produção do eucalipto mostrou uma tendência mista, com variações significativas ao longo do período analisado. Apesar de um declínio inicial em 2015, houve uma recuperação em 2016, seguida por flutuações nos anos seguintes. No entanto, em 2023, observou-se um aumento significativo no VBP, resultando no maior valor durante o período analisado. Por fim, o extrativismo apresentou uma tendência de queda geral no VBP ao longo dos anos, com variações significativas ano a ano. Após uma redução acentuada em 2015, os valores continuaram diminuindo, com dados indisponíveis para 2023. Essas tendências refletem as dinâmicas econômicas e produtivas das diferentes atividades ao longo do período analisado.

Tabela 7 – Valor Bruto da Produção por Classe em Bilhões de Reais.

Classes	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Agricultura	45,27	42,23	45,93	44,24	45,57	46,19	57,17	66,25	71,55	69,53
Pecuária	19,59	19,12	17,07	16,69	16,81	17,06	19,88	22,05	20,13	18,81
Eucalipto	0,67	0,41	0,39	0,37	0,33	0,37	0,30	0,32	0,33	0,40
Extrativismo	0,09	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao longo dos anos, houve um aumento constante no valor bruto da produção agrícola, com uma taxa média de crescimento de aproximadamente 4% ao ano. O maior aumento ocorreu entre os anos de 2020 e 2021, com um aumento de aproximadamente 9%. Esses dados sugerem um incremento significativo na atividade agrícola na área em estudo, possivelmente impulsionado por avanços tecnológicos, mudanças nas práticas agrícolas ou aumento na demanda de mercado.

A produção pecuária apresentou uma tendência de crescimento até o ano de 2021, seguida por uma queda nos anos de 2022 e 2023. O aumento médio anual foi de aproximadamente 3%, exceto nos anos mencionados, onde registrou-se uma redução de cerca de 10% em relação ao ano anterior. Essa diminuição pode ser resultado de diversos fatores, incluindo mudanças nas políticas agrícolas, flutuações nos preços das commodities e considerações ambientais.

O valor bruto da produção relacionado ao extrativismo é mínimo e mantém-se praticamente constante ao longo dos anos, com variações insignificantes. Em 2023, não há registro de valor de produção para essa classe, sugerindo uma possível interrupção ou mudança na atividade extrativista na região.

O valor bruto da produção relacionado ao plantio de eucalipto é relativamente estável ao longo dos anos, com pequenas variações. Não há uma tendência clara de crescimento ou diminuição, mas é notável que os valores permanecem em níveis baixos em comparação com outras classes de uso da terra. Essa estabilidade pode refletir uma demanda constante por produtos relacionados ao eucalipto ou possíveis limitações específicas, como condições ambientais desfavoráveis ou regulamentações restritivas.

A dinâmica do mercado florestal oferece um claro exemplo da interação entre oferta e demanda, que influencia todo o processo produtivo. Conforme observado por Salles et al. (2016), a demanda reflete a quantidade de produtos que os consumidores desejam adquirir e tende a diminuir quando os preços aumentam, ao passo que a oferta representa a quantidade de produtos que os produtores estão dispostos a disponibilizar. Nesse contexto, a ocorrência de um excesso de oferta de produtos florestais e uma redução no consumo, motivada pela crise econômica enfrentada pelo país nos últimos anos, resultou na desvalorização dos produtos florestais e desestimulou a continuidade dessa atividade. Como consequência, é possível observar diversas áreas de desmate dos plantios, com poucas áreas sendo reformadas.

A produção de eucalipto, em particular, apresenta desafios adicionais em relação ao equilíbrio de mercado, uma vez que a oferta efetiva se estabelece muitos anos após a decisão

inicial de implantação ou manejo da floresta. Isso ressalta a importância do planejamento estratégico na atividade florestal, considerando não apenas as condições atuais do mercado, mas também suas projeções a longo prazo.

As flutuações do mercado florestal e os desafios na produção de eucalipto destacam a necessidade de uma abordagem cuidadosa e proativa na gestão dessa atividade. O planejamento adequado, aliado a uma compreensão profunda das dinâmicas de oferta e demanda, é fundamental para garantir a sustentabilidade econômica e ambiental do setor florestal a longo prazo.

Tabela 8 – Análise econômica proporcional a área.

Classes	Area (ha)	VBP/ha
Pastagem	35.995	R\$ 1.455,23
Agricultura	74.027	R\$ 11.405,02
Extrativismo	19.149,6	R\$ 2,10
Eucalipto	9.779,5	R\$ 2.477,69
Total	138.951,1	R\$ 920.931.573,91

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os dados apresentados indicam a distribuição da área em hectares (ha) e o Valor Bruto da Produção (VBP) por hectare para diversas categorias de terra. No total, a área abrange 138.951,1 hectares, com um VBP global de 920.931.573,91 Reais. A área destinada à pastagem compreende 35.995 hectares, gerando um VBP/ha de R\$ 1.455,23 Reais. Para a agricultura, a área é de 74.027 hectares, resultando em um VBP/ha de R\$ 11.405,02 Reais.

O extrativismo cobre uma área de 19.149,6 hectares, contribuindo com um VBP/ha de R\$ 2,10 Reais, enquanto a silvicultura ocupa 9.779,5 hectares, com um VBP/ha de R\$ 2.477,69 Reais. Esses dados fornecem insights sobre a distribuição da área e os valores de produção monetária para diferentes tipos de terra, refletindo suas contribuições relativas para a economia ou uso da região.

Tabela 9 – Distribuição das áreas substituídas por mesorregiões.

Mesorregiões	Norte (ha)	Noroeste (ha)	Sul (ha)	Leste (ha)	Centro (ha)
Pastagem	7.491,45	5.986,10	8.957,03	7.516,09	6.044,32
Agricultura	3.892,47	1.574,91	54.913,41	8.558,19	5.088,08
Eucaliptocultura	1.876,48	2.019,14	1.915,79	2.093,69	1.874,41
Extrativismo	3.213,89	4.584,67	2.014,47	3.144,12	6.192,46
Total	16.474,30	14.164,81	67.800,71	21.312,10	19.199,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 9 representa as áreas substituídas para o cultivo de eucalipto, observou-se uma distribuição desigual entre as mesorregiões do estado. A mesorregião Sul destacou-se

significativamente, apresentando a maior concentração de áreas convertidas, totalizando 48,8% do total. Este dado ressalta a prevalência e a extensão do cultivo de eucalipto nesta região específica. Em seguida, a mesorregião Leste apresentou uma proporção substancial, com 15,3% das áreas convertidas, indicando uma presença significativa, embora em menor escala em comparação com a região Sul. A mesorregião Centro também demonstrou uma contribuição considerável, representando 13,8% do total de áreas convertidas. Já a mesorregião Norte e a mesorregião Noroeste registraram proporções menores, com 11,9% e 10,2%, respectivamente, sugerindo uma presença relativamente limitada do cultivo de eucalipto nessas áreas.

Os resultados deste estudo são consistentes com os encontrados por Cabral (2018), que analisou a expansão do setor florestal nas mesorregiões do estado de Goiás. O mesmo encontrou que a mesorregião sul do estado de Goiás apresentou a maior área de florestas plantadas, seguida pelas mesorregiões leste e centro. Essas regiões, quando somadas, representam aproximadamente 80% dos plantios florestais no estado.

A tabela 10 apresenta uma comparação dos valores do efeito econômico de substituição das classes de uso da terra - Pastagem, Agricultura, Eucalipto e Extrativismo em eucalipto em diferentes mesorregiões do estado de Goiás. Na análise dos valores apresentados na tabela, observa-se que a classe de Pastagem revela vantagens econômicas quando substituída por eucalipto. Esse resultado demonstra que a conversão de áreas de pastagem para o cultivo de eucalipto resultou em ganhos econômicos em todas as regiões.

Tabela 10 – efeito econômico de substituição por mesorregião do estado de Goiás.

Mesorregiões	Norte	Noroeste	Sul	Leste	Centro
Pastagem	7.659.710,66	6.120.549,96	9.158.208,12	7.684.904,08	6.180.077,60
Agricultura	-34.749.369,6	-14.059.743,4	-490.230.208,7	-76.401.798,2	- 45.422.976,3
Eucalipto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Extrativismo	7.956.279,46	11.349.771,08	4.987.005,25	7.783.557,43	15.330.002,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por outro lado, a classe de Agricultura revela desvantagens econômicas em todas as mesorregiões, com valores negativos significativos para o cultivo de eucalipto. Isso indica que a substituição de áreas agrícolas pelo cultivo de eucalipto resultou em perdas financeiras substanciais em todas as regiões.

Por fim, a classe de Extrativismo apresenta vantagens econômicas em todas as mesorregiões, com valores positivos para o cultivo de eucalipto. Apesar dessa vantagem, a substituição de áreas de vegetação nativa pelo cultivo de eucalipto pode ter resultados ecológicos adversos, com efeitos negativos em serviços ecossistêmicos. Este trabalho não tem

o intuito de fomentar a conversão do uso e cobertura da terra. As análises de substituição foram realizadas através de dados de transição, ou seja, de transformações que já ocorreram.

5. Considerações finais

O texto apresenta conclusões significativas sobre a classificação dos plantios de eucalipto em Goiás e sua relevância para o setor florestal e a gestão ambiental na região. O destaque é o índice Kappa de 92%, classificado como excelente segundo os critérios de Landis e Koch (1977). Isso ressalta a precisão e confiabilidade do processo de categorização, indicando que as áreas de plantio foram identificadas com alta precisão. A estimativa de aproximadamente 138,9 mil hectares de plantações de eucalipto oferece uma base sólida para o planejamento da silvicultura, gestão florestal e tomada de decisões.

A análise da presença de plantações de eucalipto em Goiás revela uma distribuição estratégica, concentrada principalmente nas mesorregiões Sul, Leste, Centro Norte e Noroeste do estado. Essa distribuição, com 55% na mesorregião Sul, 16% na Leste, 12% no Centro, 9% no Norte e 8% no Noroeste, destaca a importância dessas regiões no contexto da silvicultura em Goiás.

Essa dinâmica espacial, mencionada por Araújo (2019), ressalta a importância de se obter informações atualizadas sobre a produção esperada desses novos plantios em Goiás, especialmente em regiões não tradicionais.

A maioria dos plantios possui áreas inferiores a 10 hectares, indicando uma presença significativa de pequenos produtores na atividade de cultivo de eucalipto. Essa diversidade de tamanhos de plantações, com 76,9% dos plantios ocupando áreas menores que 10 hectares.

Em 2023, a análise de substituição demonstrou que dos 138,9 mil hectares de plantações de eucalipto identificados, diferentes usos anteriores foram substituídos. De modo, 36 mil hectares eram anteriormente destinados a pastagem, 74 mil hectares eram áreas agrícolas, 19,2 mil hectares eram de vegetação nativa e 9,7 mil hectares eram dedicados à silvicultura.

A análise de classificação das áreas de eucalipto revelou que em termos de fragilidade ambiental. A maioria das áreas, cerca de 28,5%, pertence à categoria de classe média, indicando uma presença significativa em regiões com níveis moderados de sensibilidade ambiental. Em contraste, 22,6% das áreas foram classificadas como de alto grau de fragilidade, indicando uma presença considerável em ambientes mais suscetíveis a impactos ambientais.

A predominância das plantações de eucalipto em solos de alta aptidão agrícola sugere uma expansão comercial para essas áreas, possivelmente competindo com a produção de

alimentos. O avanço em direção a terras antes dedicadas à agricultura e pastagens destaca o potencial da atividade no estado, à medida que os plantios florestais passam a disputar terras com histórico de maior retorno financeiro.

A mudança no uso da terra ao longo do tempo, especialmente com a substituição de áreas anteriormente destinadas a pastagem, agricultura, vegetação nativa e silvicultura por plantios de eucalipto reflete possíveis influências, como demanda econômica e políticas de desenvolvimento regional.

A fragilidade potencial do eucalipto é uma consideração fundamental no contexto de sua produção e plantio, referindo-se à suscetibilidade de um ecossistema específico a danos ou degradação devido a intervenções humanas ou fenômenos naturais. Embora o cultivo de eucalipto não cause alterações nos fatores intrínsecos à fragilidade ambiental, ele pode influenciar essa fragilidade de outras maneiras, como a redução da velocidade de impacto das gotas de chuva, o que melhora a infiltração e retarda o movimento de escoamento. Assim, compreender e gerenciar esses impactos é essencial para garantir a sustentabilidade e a preservação dos ecossistemas afetados pelo cultivo de eucalipto.

A análise da fragilidade potencial do solo ressalta a influência dos tipos de solo na estabilidade e vulnerabilidade ambiental. Solos como os Latossolos e Argissolos desempenham um papel fundamental na manutenção da estabilidade do solo em Goiás, enquanto áreas com Neossolos e Argissolos Vermelho Amarelo Distróficos requerem medidas de conservação mais rigorosas.

No contexto da silvicultura, padrões distintos de fragilidade ambiental indicam desafios na gestão florestal. As flutuações do mercado florestal e os desafios na produção de eucalipto destacam a importância do planejamento estratégico e da compreensão das dinâmicas de mercado para garantir a sustentabilidade econômica e ambiental do setor.

Por fim, com base na análise do efeito econômico da substituição, constata-se que o cultivo de eucalipto demonstrou vantagens econômicas superiores em comparação com pastagens e extrativismo. No entanto, não apresentou um desempenho econômico superior ao da agricultura.

6. Impacto Social e Relevância da Pesquisa

A expansão da silvicultura de eucalipto tem sido uma realidade marcante no estado de Goiás, apresentando implicações significativas tanto do ponto de vista econômico quanto ecológico. Este estudo aborda os impactos econômicos e ecológicos dessa expansão,

considerando a fragilidade ambiental como um indicador-chave. Incorporando metodologias de análise de fragilidades, o estudo avalia a vulnerabilidade dos ambientes naturais a partir de dados pedológicos, geológicos, de relevo e pluviométricos.

A pesquisa contribui para uma melhor compreensão dos efeitos sociais da expansão dos plantios de eucalipto em Goiás. Ao identificar a localização desses plantios, o estudo oferece informações sobre como as comunidades locais são afetadas. Além disso, ao analisar as fragilidades ambientais das áreas de plantio, a pesquisa destaca questões ecológicas e economias destas áreas.

A relevância desta pesquisa reside em sua capacidade de preencher lacunas de conhecimento sobre os impactos econômicos e ecológicos da expansão dos plantios de eucalipto em Goiás. Ao avaliar o impacto econômico do plantio de eucalipto em suas respectivas localidades, o estudo fornece insights importantes para tomadores de decisão, empresas e comunidades locais, que visam equilibrar o desenvolvimento econômico com a conservação ambiental.

7. Referências

ANA. Agência Nacional de Águas: Sistema de Informações hidrológicas. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>. Acesso em: 20 nov. 2023.

ALVES, Wellmo dos Santos; MARTINS, Alécio Perini; DOS SANTOS, Ana Karoline Ferreira; BORGES DE MOURA, Derick Martins. ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DOURADINHO, SUDOESTE DE GOIÁS. **Geoambiente On-line**, Goiânia, n. 29, 2018. DOI: 10.5216/revgeoamb.v0i29.47726. Disponível em: <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/47726>. Acesso em: 4 dez. 2023.

ARAÚJO, Lázaro Gabriel de Oliveira. Dinâmica de expansão da silvicultura no estado de Goiás. 2019.

ASSESSMENT, Millennium Ecosystem et al. **Ecosystems and human well-being: our human planet-summary for decision-makers**. 2005.

BACANI, Vitor Matheus et al. Sensoriamento remoto e SIG aplicados à avaliação da fragilidade ambiental de bacia hidrográfica. **Mercator (Fortaleza)**, v. 14, p. 119-135, 2015.

CABRAL, Esicleide Gomes; BARREIRA, Sybelle. Expansão do setor florestal nas mesorregiões do estado de Goiás. **Revista de Ciências Agrárias-Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 61, 2018.

CABRAL, Esicleide Gomes et al. Análise multitemporal da silvicultura no estado de Goiás via sensoriamento remoto. 2017.

CABRAL, Esicleide Gomes et al. A silvicultura do eucalipto no estado de Goiás: um registro histórico via sensoriamento remoto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, 2019.

- CANO, Priscila Lôpo Guimarães; JUNIOR, José Marcato. Aplicação de aprendizado de máquina com dados de sensoriamento remoto para o mapeamento de florestas urbanas. **Revista Geociências-UNG-Ser**, v. 20, n. 2, p. 16-27, 2021.
- CARVALHO, Cibelle Machado et al. FRAGILIDADE AMBIENTAL FRENTE AO USO DO SOLO NO ALTO CAMAQUÃ, RS. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 37, n. 1, 2020.
- CASTRO, W. J.; LEMKE-DE-CASTRO, M. L.; OLIVEIRA LIMA, J.; OLIVEIRA, L. F. C. RODRIGUES, C.; FIGUEIREDO, C. C. Erodibilidade de solos do Cerrado Goiano. **Revista Agronegócios e Meio Ambiente**. v. 4, n. 2, p. 305-320, 2011.
- CHEN, Ji et al. Differential responses of carbon-degrading enzyme activities to warming: Implications for soil respiration. **Global Change Biology**, v. 24, n. 10, p. 4816-4826, 2018.
- COCHRAN, William Gemmill. **Sampling techniques**. John Wiley & Sons, 1977.
- COGO, Franciane Diniz et al. Estoque de carbono orgânico e atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-floresta com eucalipto no Cerrado Mineiro. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e18911325774-e18911325774, 2022.
- CREPANI, Edison et al. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: Inpe, 2001.
- CRUZ, B. B. et al. Environmental fragility framework for water supply systems: a case study in the Paulista Macro Metropolis area (SE Brazil). **Environmental Earth Sciences**, v. 76, p. 1-13, 2017.
- CUNHA, E. R.; BACANI, V. M.; AYACH, L. R. Geoprocessamento aplicado à análise da fragilidade ambiental. **Revista da ANPEGE**, v. 9, p. 89-105, 2013.
- DA SILVA SOUZA, Erik Geraldo; REBELATO, Marcelo Giroto. Avaliação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Baixo Mogi com uso da geotecnologia. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 1, p. 411-426, 2021.
- DE OLIVEIRA ARAÚJO, L. G.; BARREIRA, S. Modelagem dinâmica de plantios florestais no estado de Goiás. **Revista Ciência Geográfica, [S. l.]**, v. 28, n. 1, p. 123-140, 2024. DOI: 10.18817/26755122.28.1.2024.3632. Disponível em: <https://www.ppg.revistas.uema.br/index.php/cienciageografica/article/view/3632>. Acesso em: 31 mar. 2024.
- DE VASCONCELLOS SCHIAVO, Bruna Nascimento et al. Caracterização da fragilidade ambiental de uma bacia hidrográfica urbana no município de Santa Maria-RS. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 464-474, 2016.
- DOS SANTOS, James Rafael Ulisses; MARCHIORO, Eberval. Análise empírica da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, Espírito Santo, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 39, p. 72-87, 2020.
- DOS SANTOS VIEIRA, Rubyana et al. Fragilidade ambiental emergente da bacia hidrográfica do rio Santa Maria do Doce-ES, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 03, p. 1253-1267, 2021.
- FAO. Global Forest Resources Assessment 2020. Key Findings; FAO: Rome, Italy, 2020; 16p.
- FERREIRA, Rildo Mourão; LINO, EN da S. Expansão Agrícola no Cerrado: O desenvolvimento do Agronegócio no Estado de Goiás entre 2000 a 2019. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 79, p. 01-17, 2021.

FRANÇA, Luciano CJ; PIUZANA, Danielle; ROSS, Jurandy LS. Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente em núcleo de desertificação no semiárido brasileiro (Gilbués, Piauí). **Revista espacios**, v. 38, n. 31, p. 21, 2017.

FOLEY, Jonathan A. et al. Global consequences of land use. **science**, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

GLEICK, Peter H. Transitions to freshwater sustainability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 36, p. 8863-8871, 2018.

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

GOUVEIA, Isabel Cristina Moroz-Caccia; ROSS, Jurandy Luciano Sanches. Fragilidade Ambiental: uma proposta de aplicação de Geomorphons para a variável relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 37, p. 123-136, 2019.

GUIMARÃES, Felipe Silva et al. Uma proposta para automatização do Índice de dissecação do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, 2017.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Ibá 2022**. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://www.iba.org/>>. Acesso em: 02 Jan de 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. “Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil | 2021”. IBGE, Coordenação de Geografia. - Rio de Janeiro: IBGE, 82 (pp.), 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama**. 2021. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/panorama>>. Acesso em: Abril de 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. **Pesquisa da pecuária municipal**. Goiás, 2022. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html>>. Acesso em: 02 Jan de 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. Goiás, 2023. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?&t=destaques> >. Acesso em: 02 Jan de 2022.

IMB – Instituto Mauro Borges, **Sobre Goiás: goiás - visão geral**. Goiás - Visão Geral. 2022. Disponível em: < https://www.imb.go.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=79&Itemid=458>. Acesso em: 01 abr. 2022.

IPCC, Intergovernmental Panel On Climate. **Ipcc. Climate change**, 2014.

JURAČIĆ, Mladen et al. Comparison of the vulnerability of limestone (karst) and siliciclastic coasts (example from the Kvarner area, NE Adriatic, Croatia). **Geomorphology**, v. 107, n. 1-2, p. 90-99, 2009.

LANDIS, J. Richard; KOCH, Gary G. An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, p. 363-374, 1977.

LIU, Laibao et al. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally. **Nature communications**, v. 11, n. 1, p. 4892, 2020.

LLANO, X. C. AcATaMa-QGIS plugin for Accuracy Assessment of Thematic Maps. **AcATaMa**, 2019.

MANFRÉ, Luiz Augusto et al. Environmental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: a study case on Ibiuna (the Southeastern Brazilian region). **Environmental Earth Sciences**, v. 69, p. 947-957, 2013.

MARTINS, Rodrigo Nogueira et al. Fragilidade potencial e emergente na bacia do rio Peruaçu, região norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 6, n. 2, p. 99-118, 2018.

MELO LC, SANQUETTA CR, HENTZ AMK, CORTE APD. Análise da fragilidade ambiental potencial dos solos do Paraná. *Revista do Departamento de Geografia – USP*, v. 28, p. 101-111, 2014.

OLOFSSON, Pontus et al. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. **Remote sensing of Environment**, v. 148, p. 42-57, 2014.

PANIZZA, Matteo et al. Assessment of geopolymers with Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates as a building material. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 119-133, 2018.

PARENTE, Leandro et al. Shaping the Brazilian landscape: a process drive by land occupation, large-scale deforestation, and rapid agricultural expansion. 2021.

PASSY, Paul; THÉRY, Sylvain. The use of SAGA GIS modules in QGIS. **QGIS and generic tools**, v. 1, p. 107-149, 2018.

PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C. Método de Análise Hierárquica - AHP como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Piedade (MG). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 23, n. 0, p. 4–26, 2012.

REIS, C. F; SANTOS, A. M; MOREIRA, J. M. M. A. P; OLIVEIRA, V. L. E; COSTA, A. C; DUARTE, M; FARINA, S. S; BARREIRA, S; REZENDE, W; **DIRETRIZES PARA PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO FLORESTAL NO ESTADO DE GOIÁS**, Sebrae, Goiânia, 2018.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do departamento de geografia**, v. 8, p. 63-74, 1994.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Landforms and environmental planning: Potentialities and Fragilities. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 38-51, 2012.

SALLES, F. J.; DE TOLEDO, M. C. B.; CÉSAR, A. C. G.; FERREIRA, G. M.; BARBÉRIO, A. Cytotoxic and genotoxic assessment of surface water from São Paulo State, Brazil, during the rainy and dry seasons. *Ecotoxicology*, v. 25, p. 633-645, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s10646-016-1622-1>

SENEVIRATNE, Sonia et al. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. 2012.

SEIXAS, W. Soja incrementa agronegócio em Goiás. DM/Opinião, 2015. Disponível em: <<https://www.dm.com.br/opiniao/2015/04/soja-incrementa-agronegocio-em-goias.html>> Acesso em: 01 jan. 2024.

SOARES, Cleonice Batista Regis; MARTINS, Alécio Perini. Análise empírica da fragilidade ambiental na microrregião Rio Vermelho (GO). **Geosul**, v. 36, n. 80, p. 68-94, 2021.

TONELLO, Kelly Cristina et al. Precipitação efetiva em diferentes formações florestais na Floresta Nacional de Ipanema. **Revista Árvore**, v. 38, p. 383-390, 2014.

- TREVISAN, Diego Peruchi; MOSCHINI, Luiz Eduardo. DETERMINAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS, SÃO PAULO, BRASIL. **Geografia Ensino & Pesquisa**, p. 159-167, 2016.
- Tricart, Jean. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 1977. p. 91
- VALE JÚNIOR, J. F.; SILVABARROS, L.; SOUSA, M. I. L.; UCHÔA, S. C.P. Erodibilidade e suscetibilidade à erosão dos solos de cerrado com plantio de *Acacia mangium* em Roraima. *Revista Agroambiente*, Online. v. 3, n. 1, p. 1-8, 2009.
- VALLE, Ivana Cola; FRANCELINO, Márcio Rocha; PINHEIRO, Helena Saraiva Koenow. Mapeamento da fragilidade ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e ambiente**, v. 23, p. 295-308, 2016.
- VICK, Erivelton Pereira et al. AVALIAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL COMO SUBSÍDIO PARA GESTÃO AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DO BELTRÃO-MS. **Geo UERJ**, n. 39, p. 44364, 2021.
- VÖRÖSMARTY, Charles J. et al. Global threats to human water security and river biodiversity. **nature**, v. 467, n. 7315, p. 555-561, 2010.
- WANG, L.; HUANG, J.; DU, Y.; HU, Y.; HAN, P. Dynamic assessment of soil erosion risk using Landsat TM and HJ satellite data in DanjiangkouReservoir area, China. *Remote Sensing*, v. 5, n. 8, p. 3826-3848, 2013.
- WRAY, Robert AL; SAURO, Francesco. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. **Earth-Science Reviews**, v. 171, p. 520-557, 2017.
- ZHANG, Lei et al. A modelling study of the terrain effects on haze pollution in the Sichuan Basin. **Atmospheric environment**, v. 196, p. 77-85, 2019.