

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO APLICADA AO DIAGNÓSTICO E ADEQUAÇÃO DE
ESTRADAS FLORESTAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEYSE SCORPIONI DE OLIVEIRA

**IRATI, PR
2023**

DEYSE SCORPIONI DE OLIVEIRA

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO APLICADA AO DIAGNÓSTICO E ADEQUAÇÃO DE
ESTRADAS FLORESTAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração Manejo Sustentável de Recursos Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho
Orientador

Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes
Coorientador

IRATI, PR
2023

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da UNICENTRO

O48a

Oliveira, Deyse Scorpioni de
Análise multicritério aplicada ao diagnóstico e adequação de estradas florestais / Deyse Scorpioni de Oliveira. -- Irati, 2023.
ix, 45 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, 2023.

Orientador: Paulo Costa de Oliveira Filho
Coorientador: Eduardo da Silva Lopes
Banca examinadora: Paulo Costa de Oliveira Filho, Nilton Cesar Fiedler, Vagner Alex Pesck
Bibliografia

1. Planejamento florestal. 2. Geotecnologias. 3. Zoneamento de criticidade.
I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais.

| CDD 634.9



TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa Nº 174

Deyse Scorpioni de Oliveira

"Análise Multicritério Aplicada à Adequação de Estradas Florestais".

Dissertação aprovada em 04/12/2023, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler
Universidade Federal do Espírito Santo
Primeiro Examinador

Prof. Dr. Vagner Alex Pesck
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Segundo Examinador

Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati - PR
2023

Home Page: <http://www.unicentro.br>

Campus Santa Cruz: Rua Salvatore Renna – Padre Salvador, 875, Bairro Santa Cruz – Cx. Postal 3010 – Fone: (42) 3621-1000 – FAX: (42) 3621-1090
CEP 85.015-430 – GUARAPUAVA – PR

Campus Cedeteg: Alameda Élio Antonio Dalla Vecchia, 838, Bairro Vila Carli – Fone: (42) 3629-8100 – CEP 85.040-167 – GUARAPUAVA – PR

Campus de Irati: Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez – Cx. Postal, 21 – Fone: (42) 3421-3000
CEP 84.505-677 – IRATI – PR

AGRADECIMENTOS

À Deus por Sua graça e misericórdia.

Ao meu orientador, Prof. Paulo Costa de Oliveira Filho, pela orientação exemplar e apoio constante ao longo deste processo. Suas valiosas contribuições e insights foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Eduardo da Silva Lopes, pelas contribuições e sugestões, essenciais para a melhoria deste trabalho.

Ao meu amigo Prof. Pedro Paulo Gomes de Oliveira, pela incansável paciência, pelo voto de confiança, constante otimismo, pelo exemplo profissional e pessoal que transmite, e sem dúvida por todo conhecimento transmitido e apoio oferecido.

À Arlete, minha companheira de vida, por todo apoio e incentivo, por me ouvir atentamente, por sempre me dizer que eu seria capaz, e por ser segurança em meio às incertezas. Aos meus pais, Edilon e Darci, pelo amor incondicional, encorajamento e apoio ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Suas palavras de ânimo e confiança em mim foram fontes de inspiração.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) por tornar possível a realização deste estudo e a conclusão desta dissertação. Em especial, quero agradecer a Silvana A. Kowalski, por todo suporte e amizade.

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

RESUMO

O planejamento inadequado de estradas florestais pode acarretar impactos ambientais negativos e aumentar os custos associados à sua construção e manutenção, neste contexto é fundamental a utilização de metodologias que auxiliem o planejamento florestal. Desta forma, o objetivo do estudo foi utilizar um modelo espacial através de geotecnologias integradas com métodos de análise multicritério para diagnosticar e adequar as estradas florestais. Para essa abordagem metodológica foram utilizados os critérios: uso do solo, temperatura, hipsometria, declividade, orientação das vertentes, distância ao fluxo de água acumulado e erodibilidade (K). O mapa final de criticidade deu-se através da agregação dos critérios por meio do Processo Analítico Hierárquico (AHP) e Combinação Linear Ponderada (CLP). Obteve-se os seguintes níveis de criticidade para a área de estudo: Baixo (16,33%), Moderado (73,59%), Alto (10,06%) e Extremo (0,03%). Para as estradas obteve-se os seguintes níveis de criticidade: Baixo (35,71%), Moderado (62,98%) e Alto (1,32%). O modelo de otimização baseado na análise de caminho de menor custo simulou uma rota cuja as distâncias consistentemente se mostraram menores do que as distâncias reais. Conclui-se que a combinação da CLP com o AHP para criar um mapa de criticidade se mostrou uma ferramenta valiosa no planejamento do sistema viário florestal.

Palavras-chave: Planejamento florestal. Geotecnologias. Zoneamento de criticidade

ABSTRACT

Inadequate planning of forest roads can lead to negative environmental impacts and increase the costs associated with their construction and maintenance. In this context, it is essential to develop methodologies that assist forest planning. Therefore, the objective of the study was to develop a spatial model using geotechnologies integrated with multi-criteria analysis methods to diagnose and adapt forest roads. For this methodological approach, the following criteria were used: land use, temperature, hypsometry, slope, slope orientation, distance to the accumulated water flow and erodibility (K). The final criticality map was obtained through the aggregation of criteria through the Analytical Hierarchical Process (AHP) and Weighted Linear Combination (CLP). The following criticality levels were obtained for the study area: Low (16.33%), Moderate (73.59%), High (10.06%) and Extreme (0.03%). For roads, the following criticality levels were obtained: Low (35.71%), Moderate (62.98%) and High (1.32%), and no roads were identified in areas of extreme risk. The optimization model based on least cost path analysis simulated a route whose distances consistently proved to be smaller than the actual distances. It is concluded that the combination of CLP with AHP to create a criticality map proved to be a valuable tool in planning the forest road system, providing a solid basis for proactive decisions

Keywords: Forest planning. Geotechnologies. Criticality zoning

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1- Estrutura Básica da Hierarquia de Decisão do método AHP | 13 |
| FIGURA 2- Localização geográfica da Fazenda Santa Cecília, município de Apiaí, estado de São Paulo, Brasil | 15 |
| FIGURA 3- Classificação dos critérios. | 25 |
| FIGURA 4- Mapa de criticidade para alocação de estradas florestais | 29 |
| FIGURA 5- Mapa de criticidade reclassificado para alocação de estradas florestais. | 30 |
| FIGURA 6- Quantificação das estradas florestais em relação ao nível de criticidade | 33 |
| FIGURA 7- Rota simulada utilizando o complemento <i>Cost distance analysis</i> nos diferentes trechos (A-B, B-C, C-D, D-C) da estrada principal | 34 |
| FIGURA 8- A – Uso e Ocupação do solo com a estrada previamente definida (estrada existente); B - novo mapa de zoneamento. | 37 |
| FIGURA 9- Validação da alocação de estradas florestais: A - rota simulada; B - rota real e C – rota validada | 39 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1- Escala numérica de Saaty. | 13 |
| TABELA 2- Matriz de comparação pareada ou matriz de julgamentos. | 14 |
| TABELA 3- Classificação do relevo de acordo com as classes de declividade | 19 |
| TABELA 4- Classificação da orientação de vertentes. | 19 |
| TABELA 5- Critérios reclassificados e coeficientes associados para avaliação de risco na alocação de estradas florestais. | 23 |
| TABELA 6- Matriz de comparação pareada entre os mapas de critérios | 26 |
| TABELA 7- Distribuição de áreas por classes de criticidade na alocação de estradas florestais | 28 |
| TABELA 8- Quantificação das estradas florestais em relação ao nível de criticidade..... | 32 |
| TABELA 9- Distâncias comparativas das estradas florestais simulada e real..... | 35 |
| TABELA 10- Quantificação das estradas florestais simuladas e reais em relação ao nível de criticidade | 35 |
| TABELA 11- Distâncias comparativas entre os pontos simulados, validados e reais das estradas florestais. | 38 |

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| RESUMO | ii |
| ABSTRACT | iii |
| LISTA DE FIGURAS | iv |
| LISTA DE TABELAS | v |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 2 |
| 2.1. Objetivo Geral | 2 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 2 |
| 3. REFERENCIAL TEÓRICO | 3 |
| 3.1. Geotecnologias aplicadas às estradas florestais | 3 |
| 3.1.1. Importância e aplicações das geotecnologias na gestão de estradas florestais..... | 3 |
| 3.1.2. Principais tipos de geotecnologias utilizadas..... | 4 |
| 3.1.3. Vantagens e Limitações das Geotecnologias Aplicadas às Estradas Florestais | 5 |
| 3.2. Diagnóstico de Estradas Florestais | 5 |
| 3.2.1. Objetivos do diagnóstico de estradas florestais | 6 |
| 3.2.2. Métodos e técnicas para realizar o diagnóstico | 6 |
| 3.2.3. Indicadores e parâmetros relevantes para o diagnóstico..... | 7 |
| 3.3. Adequação e Planejamento de Estradas Florestais | 8 |
| 3.3.1. Importância do planejamento e adequação de estradas florestais..... | 8 |
| 3.3.2. Considerações ambientais, técnicas e socioeconômicas no planejamento | 9 |
| 3.3.3. Métodos para avaliar a viabilidade e impacto das estradas florestais..... | 10 |
| 3.4. Análise Multicritério Aplicado às Estradas Florestais | 10 |
| 3.4.1. Conceito de análise multicritério..... | 10 |
| 3.4.2. Aplicações da análise multicritério no contexto de estradas florestais | 11 |
| 3.4.3. Técnicas e ferramentas utilizadas na análise multicritério | 12 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 15 |
| 4.1. Caracterização da área de estudo | 15 |
| 4.2. Obtenção das imagens de satélite e dados vetoriais..... | 16 |
| 4.3. Elaboração de mapa com zonas críticas para alocação de estradas..... | 17 |
| 4.3.1 Confecção de mapas temáticos (critérios)..... | 17 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3.1.1 | Uso e ocupação do solo | 17 |
| 4.3.1.2 | Temperatura..... | 17 |
| 4.3.1.3 | Hipsometria | 18 |
| 4.3.1.4 | Declividade..... | 18 |
| 4.3.1.5 | Orientação de vertentes | 19 |
| 4.3.1.6 | Distância vertical ao fluxo acumulado de água | 20 |
| 4.3.1.7 | Erodibilidade (Fator K) | 20 |
| 4.3.2 | Zoneamento de criticidade para alocação de estradas..... | 21 |
| 4.3.2.1 | Normalização dos critérios | 21 |
| 4.3.2.2 | Hierarquização e ponderação dos critérios | 21 |
| 4.3.2.3 | Agregação dos critérios | 22 |
| 4.4 | Alocação de estradas florestais | 22 |
| 4.5 | Validação para a alocação de estradas florestais..... | 23 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 23 |
| 5.1 | Critérios avaliados | 23 |
| 5.2 | Matriz de comparação pareada utilizando o método AHP..... | 26 |
| 5.3 | Mapa de criticidade para estradas florestais..... | 27 |
| 5.4 | Quantificação das estradas florestais em relação ao nível de criticidade | 31 |
| 5.5 | Aplicação de modelo de otimização de rota | 33 |
| 5.6 | Validação da alocação de estradas florestais | 36 |
| 6 | CONCLUSÕES | 39 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 40 |

1. INTRODUÇÃO

Um conjunto de estradas conectadas compõe a infraestrutura viária nas áreas florestais, sendo responsáveis por possibilitar o acesso às zonas de produção, facilitar o transporte de matéria-prima e de trabalhadores e viabilizar o escoamento da produção. Adicionalmente, essas vias servem como elo entre os agrupamentos florestais e as instalações de processamento de madeira. (SILVA, et al., 2007).

A sua composição é definida de acordo com as características técnicas relacionadas ao volume de tráfego, e pode ser classificada em estradas primárias, estradas secundárias, divisoras, contorno, estradas terciárias, aceiros, trilhas, ramais ou caminhos de máquinas (CORRÊA, et al., 2006).

Quando as estradas florestais são mal planejadas e manejadas, elas podem acarretar impactos negativos significativos ao meio ambiente, como processos erosivos, desencadeados principalmente pela água levando à instabilidade das encostas e conseqüentemente o transporte de sedimentos que pode causar o assoreamento de rios e lagos, perda de áreas de produção e danos ao sistema de drenagem (CORRÊA, et al., 2006). Portanto, é fundamental que o planejamento e a gestão de estradas florestais levem em consideração medidas de mitigação e boas práticas para minimizar esses impactos negativos e promover o manejo sustentável das florestas.

Atualmente, um dos maiores desafios do setor de logística florestal está em determinar os locais apropriados para a construção das estradas florestais. O planejamento adequado e eficiente da localização das estradas visa planejar rotas que minimizem a extensão das estradas, reduzindo assim os impactos no ambiente e os custos de construção e manutenção. (ZAGONEL, et al. 2008). Pois de acordo com Lopes, et al. (2002), os custos do binômio estrada-transporte constituem uma parte importante do orçamento das empresas florestais, uma vez que tem impacto no valor final da madeira.

Nesse contexto, a aplicação de metodologias que auxiliem o planejamento florestal é de suma importância para a minimização dos impactos ambientais, evitando áreas propensas a erosão ou deslizamentos de terra, garantindo que elas estejam localizadas estrategicamente para facilitar o acesso a áreas de produção, minimizando a extensão desnecessária da rede viária o que resultará em economias significativas, além da redução dos custos de construção, manutenção e operação. De acordo com Çalişkan (2013), a seleção da rota adequada no

planejamento de estradas florestais é um problema de engenharia complexo que depende de uma variedade de fatores, incluindo considerações ambientais, topográficas, logísticas e socioeconômicas. Para abordar essa complexidade e tomar decisões informadas, a combinação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) com métodos de Análise Multicritério (AMC) têm se apresentado como uma ferramenta decisiva. Essa abordagem oferece benefícios significativos nas tomadas de decisões relacionadas ao planejamento de estradas florestais, oferecendo uma visão mais abrangente através da análise espacial e mapeamento de dados, permitindo uma abordagem mais eficiente e assertiva na identificação de locais adequados para estradas florestais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um modelo espacial utilizando geotecnologias integradas com métodos de análise multicritério visando diagnosticar e adequar as estradas florestais para facilitar o acesso a áreas de produção e o transporte de produtos florestais

2.2. Objetivos Específicos

- a) Elaborar um mapa com as zonas críticas para a alocação de estradas florestais, por meio dos métodos de Combinação Linear Ponderada e Processo Analítico Hierárquico;
- b) Quantificar as estradas florestais em relação ao nível de criticidade por meio de ferramentas de geoprocessamento; e
- c) Aplicar um modelo de otimização baseado na análise de caminho de menor custo em ambiente SIG para determinar a melhor rota para a alocação de estradas florestais.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Geotecnologias aplicadas às estradas florestais

As geotecnologias referem-se ao conjunto de técnicas, métodos e ferramentas utilizadas para coletar, processar, analisar e visualizar dados geoespaciais, ou seja, informações que possuem uma componente espacial associada a elas. Essas tecnologias têm ampla aplicação em diversas áreas, incluindo geografia, meio ambiente, planejamento territorial, cartografia e monitoramento de recursos naturais (ROSA, 2011). No contexto das estradas florestais, as geotecnologias desempenham um papel fundamental na gestão e monitoramento dessas vias, auxiliando na tomada de decisões e no planejamento adequado de sua construção e manutenção (ABDI, et al., 2009).

3.1.1. Importância e aplicações das geotecnologias na gestão de estradas florestais

As estradas florestais desempenham um papel crucial na gestão de recursos naturais, permitindo o acesso a áreas remotas e facilitando as operações de exploração florestal e transporte. No entanto, a construção e manutenção dessas estradas apresentam desafios específicos devido às condições ambientais e topográficas das áreas florestais (ÇALIŞKAN, 2013).

A aplicação das geotecnologias nas estradas florestais abrange a obtenção de informações precisas sobre a topografia e a geomorfologia dos terrenos. A utilização de técnicas como sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas (SIG) e Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) permite mapear e modelar as características do terreno, identificando áreas de risco, como solos instáveis e encostas íngremes. Essas informações são fundamentais para o planejamento das estradas, auxiliando na escolha de rotas seguras e na determinação da necessidade de intervenções adicionais (SREENIVASAN e JHA, 2022).

Além disso, as geotecnologias desempenham um papel importante na gestão e manutenção das estradas florestais. A utilização de técnicas como o monitoramento via satélite e o uso de drones permite avaliar o estado das estradas, identificar áreas com potencial de erosão, detectar deslizamentos de terra e avaliar a eficácia de medidas de mitigação implementadas. Essas informações permitem planejar ações de manutenção e adequação da infraestrutura, contribuindo para a segurança tanto das estradas quanto das operações florestais

SAMANI, et al. (2010)

Outra aplicação relevante das geotecnologias é a avaliação do impacto ambiental das estradas florestais. O uso de técnicas como a análise multicritério e a modelagem de dados espaciais permite avaliar os impactos da construção e uso das estradas nas áreas florestais, como a fragmentação do habitat, a perda de biodiversidade e o aumento da pressão sobre os recursos naturais. Essas informações são essenciais para a implementação de medidas de mitigação, como a construção de passagens de fauna e a implementação de programas de reflorestamento (HOSSEINI et al. 2019).

3.1.2. Principais tipos de geotecnologias utilizadas

3.1.2.1. Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto é uma das geotecnologias utilizadas no planejamento e monitoramento das estradas florestais. Essa técnica consiste na obtenção de informações sobre o ambiente através da captação e análise de dados coletados por sensores instalados em satélites, aeronaves, drones e equipamentos terrestres. Esses sensores captam diferentes comprimentos de onda, permitindo identificar diferentes características e fenômenos relacionados às estradas florestais, como a detecção de áreas desmatadas, erosão do solo, vegetação presente ao redor das estradas e topografia (EMMERT, et al., 2010). Com essas informações, é possível identificar áreas de risco para deslizamentos de terra e planejar ações preventivas.

3.1.2.2. Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Outra geotecnologia amplamente utilizada nas estradas florestais é o Sistema de Informação Geográfica (SIG). Ele permite a criação, organização, análise e apresentação de informações geográficas, possibilitando o mapeamento e monitoramento das estradas e suas características. Com o uso de programas de SIG, é possível integrar diferentes fontes de dados, como mapas topográficos, imagens de satélite e dados coletados em campo, proporcionando uma visão completa e precisa das estradas florestais (ROSA, 2011). Além disso, com o uso de SIG, é possível realizar análises espaciais, como o cálculo da cobertura florestal ao redor das estradas, identificação de áreas de proteção ambiental e planejamento de rotas alternativas.

3.1.2.3. Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS)

O Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) também desempenha um papel importante nas geotecnologias aplicadas às estradas florestais. Ele consiste em uma rede de satélites que permite determinar a posição geográfica de um receptor GNSS, como um dispositivo de GPS (ROSA, 2005). Com o uso de GNSS, é possível obter informações precisas sobre a localização das estradas florestais, facilitando o planejamento de rotas, a orientação de equipes de manutenção e a resposta a emergências em tempo real. Além disso, o GNSS também pode ser utilizado para monitorar o deslocamento e a velocidade de veículos que transitam pelas estradas florestais, auxiliando na prevenção de acidentes.

3.1.3. Vantagens e Limitações das Geotecnologias Aplicadas às Estradas Florestais

As geotecnologias aplicadas às estradas florestais apresentam diversas vantagens. O uso de Sensoriamento Remoto, SIG e GNSS permite a obtenção de informações precisas e atualizadas sobre as estradas, facilitando o planejamento e a gestão dessas vias. Além disso, essas geotecnologias permitem a integração e análise de dados de diferentes fontes, proporcionando uma visão completa e precisa das estradas florestais. Com isso, é possível tomar decisões mais informadas e eficientes, reduzindo custos e otimizando recursos (SOUZA et al, 2017)).

No entanto, é importante ressaltar as limitações das geotecnologias aplicadas às estradas florestais. O Sensoriamento Remoto, por exemplo, depende das condições climáticas e atmosféricas para captar imagens e dados, o que pode dificultar a obtenção de informações em determinadas situações (MENESES e ALMEIDA, 2012). Além disso, a interpretação e análise dos dados de Sensoriamento Remoto podem ser complexas e requerem expertise técnica. Já o uso de SIG depende de uma infraestrutura adequada e da disponibilidade de dados geográficos de qualidade. Por fim, o GNSS pode apresentar limitações em áreas com obstáculos físicos, como florestas densas, que podem bloquear o sinal dos satélites (ROSA, 2011).

3.2. Diagnóstico de Estradas Florestais

As estradas florestais estão entre as principais causas de processos erosivos em florestas plantadas o que desencadeia uma série de problemas ambientais e econômicos, relacionados ao

desprendimento e transporte de sedimentos (DIETRICH et al 2019). Neste contexto, o diagnóstico de estradas florestais desempenha um papel fundamental na identificação e avaliação de problemas relacionados a essas vias. Ele serve como um instrumento valioso para coletar dados, analisar condições e identificar questões que precisam ser abordadas.

3.2.1. Objetivos do diagnóstico de estradas florestais.

O objetivo do diagnóstico é determinar as condições em que as estradas florestais se encontram, servindo como um instrumento valioso para identificar problemas específicos nas estradas florestais, como erosão, desgaste do pavimento, obstruções de vegetação, problemas de drenagem, entre outros. Sendo possível com base nas informações coletadas, priorizar ações de manutenção e melhorias para abordar os problemas mais críticos e urgentes. De acordo com Emmert et al. (2010), a predição de defeitos em estradas facilita na tomada de decisão quanto às ações necessárias, subsidiando o desenvolvimento de programa de manutenção preventivo e regular. Através de diagnósticos regulares ao longo do tempo, é possível monitorar tendências e padrões de degradação das estradas florestais e tomar medidas preventivas (FEARNSIDE, 2022).

No geral, o diagnóstico de estradas florestais é uma ferramenta crucial para garantir que essas vias sejam mantidas de maneira eficaz, sustentável e segura, com o mínimo de impacto ambiental possível. Isso é essencial para a gestão responsável das florestas e o sucesso das operações florestais a longo prazo.

3.2.2. Métodos e técnicas para realizar o diagnóstico

São várias as técnicas e métodos que podem ser utilizados para realizar um diagnóstico abrangente, algumas das mais comuns são:

Inspeção de campo: Realizar inspeções físicas in loco para avaliar o estado do pavimento, a presença de erosão, a qualidade da drenagem e a condição geral da estrada, através dos defeitos observados com a finalidade de utilização dos sistemas de gerência de vias, esse tipo de levantamento compreende a seleção dos defeitos mais relevante, avaliação da extensão e gravidade (EMMERT et al.,2010).

Coleta de dados geoespaciais: Utilizar tecnologias de sensoriamento remoto, como imagens de satélite, drones e sistemas de informações geográficas (SIG) para coletar dados

sobre a área circundante, vegetação, topografia, erosão e a densidade das estradas. De acordo com Morais (2014), os gestores dos empreendimentos florestais têm procurado aplicar novas tecnologias e utilização de softwares no planejamento

Entrevistas e consulta: Conversas com trabalhadores florestais, comunidades locais e partes interessadas para coletar informações sobre preocupações, necessidades e problemas relacionados à estrada.

Modelagem computacional: A utilização de software de modelagem para prever possíveis problemas e avaliar cenários futuros com base em dados coletados.

A combinação de várias dessas técnicas e métodos pode fornecer um diagnóstico mais completo e preciso das condições da estrada florestal. Após a coleta e análise dos dados, os gestores florestais podem elaborar um plano de ação para abordar os problemas identificados e melhorar a gestão da estrada.

3.2.3. Indicadores e parâmetros relevantes para o diagnóstico

Na realização de um diagnóstico completo e abrangente das estradas florestais, é importante considerar uma série de indicadores e parâmetros relevantes, visto que eles ajudam a avaliar o estado das estradas, seus impactos ambientais, segurança e eficácia (CORRÊA et al. 2006). Alguns dos mais relevantes para o diagnóstico de estradas florestais são: Estado do pavimento, ou seja, a condição do revestimento da estrada, incluindo a presença de buracos, rachaduras, erosão e desgaste.

A densidade das estradas que é parâmetro importante para o diagnóstico e a gestão dessas vias, referindo-se à quantidade de estradas por unidade de área em uma determinada floresta ou região, desempenhando um papel significativo no diagnóstico, pois quanto maior a densidade das estradas, maiores os custos de construção e manutenção, menor a área produtiva, e quando associada a um mau planejamento ou a sistemas de drenagem deficientes, maior será a propensão a processos erosivos, logo, aumentando o assoreamento dos mananciais.

O modo de drenagem, onde se avaliar a presença e a eficácia de valas, canais e outros sistemas de drenagem para evitar acúmulo de água e erosão. A identificação de árvores, arbustos e vegetação que podem obstruir a visibilidade ou representar riscos de queda. Observa-se ainda os parâmetros técnicos e geométricos, sendo analisada a geometria da estrada, incluindo a presença de curvas fechadas, aclives e declives acentuados, verificando se a largura da estrada é adequada para o tráfego e equipamentos utilizados. O uso de indicadores hidrológicos para identificar áreas suscetíveis à erosão do solo. O impacto nas comunidades

locais, como acesso a serviços e empregos (OLIVEIRA et al. 2013; CORRÊA et al. 2006).

Esses indicadores e parâmetros ajudam a fornecer uma imagem completa das condições e impactos das estradas florestais, permitindo que os gestores florestais identifiquem problemas e tomem medidas apropriadas para melhorar a gestão dessas vias.

3.3. Adequação e Planejamento de Estradas Florestais

Para que qualquer empreendimento obtenha êxito, o planejamento de suas atividades é tarefa fundamental, sendo esta responsável por traçar os planos e ações necessários para alcançar os objetivos almejados pela instituição. Deste modo, o planejamento pode ser conceituado como um instrumento administrativo que visa antecipar e definir o que será feito, onde será, as técnicas utilizadas e quem serão os responsáveis, de acordo com as necessidades do problema (SILVA 2015).

3.3.1. Importância do planejamento e adequação de estradas florestais

O termo "planejamento" pode ter definições variadas em diferentes obras da literatura administrativa e do planejamento. A diversidade de definições decorre das diferentes perspectivas e abordagens de autores e profissionais em relação a esse conceito. No entanto, em sua essência, o planejamento é uma atividade fundamental na gestão de organizações e projetos, independentemente das variações nas definições (RODE, 2014).

O planejamento é um processo fundamental em organizações de todos os tipos, sejam elas empresas, instituições governamentais, organizações sem fins lucrativos, ou mesmo no contexto do manejo florestal. É uma atividade que envolve a elaboração de planos e programas para orientar a tomada de decisão e direcionar as ações futuras da organização. O objetivo principal do planejamento é estabelecer metas, definir estratégias e alocar recursos para alcançar esses objetivos de maneira eficaz e eficiente (KAZAMA et al. 2021).

O planejamento de estradas florestais está classificado em três níveis hierárquicos: estratégico, tático e operacional (BANHARA, 2010; GOMES 2021). Essa hierarquia de planejamento permite que as estradas florestais sejam desenvolvidas e gerenciadas de forma holística, considerando objetivos de longo prazo, restrições ambientais e necessidades operacionais. O planejamento estratégico define a visão geral e as diretrizes, o planejamento tático traduz essas diretrizes em planos concretos, e o planejamento operacional implementa

esses planos no terreno. Essa abordagem hierárquica ajuda a garantir que as estradas florestais sejam construídas e gerenciadas de forma eficiente e sustentável (BANHARA, 2010).

3.3.2. Considerações ambientais, técnicas e socioeconômicas no planejamento

O planejamento de estradas florestais deve incluir parâmetros financeiros, ambientais, sociais e técnicos (CORRÊA et al. 2009; HAYATI 2012; KANTARTZIS 2023). Desta forma um planejamento multifuncional da rede viária é pré-requisito para a gestão sustentável (TAMPEKIS et al. 2015).

No que tange a questão ambiental, a construção de estradas gera uma grande quantidade de sedimentos, que em contato com as águas das chuvas são carreados pelas enxurradas provocando poluição e assoreamentos de corpos d'água. Além disso, a construção e manutenção de estradas florestais são atividades onerosas que têm a capacidade de alterar a paisagem, causar fragmentação ecológica e perdas de habitats (FU et al. 2009; JAAFARI et al. 2015).

No aspecto social a construção e a manutenção de estradas florestais geram empregos, fortalecendo a economia local, proporcionando a conexão entre polos trazendo uma maior facilidade de deslocamento de pessoas, escoamento de produções regionais, como por exemplo os agrícolas. Pois as estradas não são usadas apenas para o proveito da empresa, mas sim de vários outros agentes sociais da região (CORRÊA et al, 2006).

Os requisitos técnicos estão relacionados com as normas técnicas para a construção e os procedimentos de manutenção e conservação, é nessa fase do planejamento onde se contemplam os projetos geométrico, geotécnico, drenagem, etc. (MARCATTI 2017).

Já o econômico está basicamente ligado com a produção e o suprimento de madeira, sendo indispensáveis para a cadeia produtiva. Sendo assim, é fundamental a integração do planejamento da colheita com o planejamento de estradas, uma vez que a movimentação de produtos da cadeia de suprimentos depende de uma rede viária ideal (GOMES 2021).

Nesse sentido, o planejamento deve equilibrar essas considerações para garantir o acesso necessário aos recursos florestais, ao mesmo tempo em que minimiza o impacto ambiental, atende às necessidades das comunidades locais e promove práticas florestais sustentáveis. Essa abordagem integrada é crucial para uma gestão florestal responsável e sustentável

3.3.3. Métodos para avaliar a viabilidade e impacto das estradas florestais

Algumas das abordagens mais comuns na análise da viabilidade e impacto das estradas florestais é a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), que é um processo formal que avalia os possíveis impactos ambientais das estradas florestais. Ela envolve a coleta de dados sobre a área, a identificação de impactos potenciais (como erosão, fragmentação de habitats e poluição da água), a proposição de medidas de mitigação e a consulta a partes interessadas. A AIA é frequentemente um requisito legal antes da construção de estradas (VILHENA, 2017).

Outra metodologia para esse tipo de avaliação é a de impacto social, que considera os efeitos das estradas nas comunidades locais. Isso inclui a análise de como as estradas afetam o acesso a serviços, empregos, segurança e qualidade de vida. A participação das comunidades locais é fundamental nesse processo (CARVALHO, 2022). Têm-se ainda a análise de risco, que avalia os possíveis riscos associados às estradas florestais, como erosão, deslizamentos de terra e impactos climáticos. Isso ajuda a identificar medidas de gerenciamento de riscos para reduzir os impactos negativos (FERRAZ et al. 2007; MARCELINO et al. 2012).

Também a análise de custo-benefício (ACB) é metodologia importante para a tomada de decisões em projetos, programas ou políticas. Ela tem como objetivo avaliar e comparar os custos estimados de uma determinada ação ou projeto com os benefícios esperados, geralmente em termos monetários. Isso permite que os tomadores de decisão avaliem se os benefícios superam os custos, ajudando a determinar se o projeto é adequado e aceitável (MOURA 2023).

3.4. Análise Multicritério Aplicado às Estradas Florestais

3.4.1. Conceito de análise multicritério

Algumas definições fornecidas pela literatura apontam que a Avaliação Multicritério (AMC) ou Multicriteria Analysis (MCA) é ramo da área de Pesquisa Operacional com uma abordagem de tomada de decisão que lida com situações em que várias alternativas precisam ser avaliadas em relação a múltiplos critérios ou objetivos. É usada quando não há uma única solução óbvia e os decisores precisam considerar diversos fatores ou critérios que podem ser conflitantes ou complementares. A AMC fornece uma estrutura que permite avaliar e comparar alternativas de forma sistemática e transparente. (SAATY 1990). É uma ferramenta matemática que permite a comparação de diferentes cenários ou alternativas conforme muitos critérios, com

o propósito de orientar a tomada de decisão na direção de uma escolha acertada.

De acordo com Malczewski (2006), a AMC quando apoiada por SIG (AMC - SIG), pode ser observada como um processo que combina e transforma dados espaciais e não espaciais (dados de entrada) em uma decisão final (resultados). Ela é uma forma (regra de decisão) que define a relação entre os mapas de entrada e o mapa de saída ou mapa final. Essa integração permite que se leve em conta múltiplos critérios e informações geográficas de forma mais eficiente e precisa do que os métodos convencionais que envolvem o cruzamento de planos de informação (overlay) para a priorização de áreas (VILELA, 2019).

Segundo Malczewski (2004), essa avaliação compreende a utilização de dados georreferenciados, as concepções dos tomadores de decisão e a manipulação desses dados e concepções com base em regras de decisão próprias. Segundo o mesmo autor, duas considerações são de extrema importância para a utilização da AMC - SIG: (i) a capacidade do SIG de adquirir, armazenar, recuperar, manipular e analisar os dados georreferenciados e (ii) a capacidade de combinar esses dados e as concepções dos tomadores de decisão em alternativas de decisão.

3.4.2. Aplicações da análise multicritério no contexto de estradas florestais

A Análise Multicritério vem sendo amplamente utilizada para apoiar decisões em diferentes áreas de aplicação e é crescente o seu uso no contexto de estradas florestais, como demonstrado por Hasseini et al. (2019), que trabalhou com o método AHP (Processo Hierárquico Analítico) e CLP (Combinação Linear Ponderada) para projetar estradas florestais na floresta de Darabkla na província de Mazandaran no Irão, no estudo utilizaram o método de avaliação multicritério baseado em lógica *fuzzy*. Çalişkan (2013) projetou a rede de estradas florestais usando Sistemas de Informação Geográfica (GIS) baseados em Análise de Decisão Multicritério (MCDA) em áreas montanhosas da Turquia. Os critérios utilizados foram declividade, aspecto, elevação, estoque crescente, rede hidrográfica, solo, rocha e mapa de suscetibilidade a escorregamentos. Samani et al. (2010) trabalharam na província de Guilan, no norte do Irão com método apropriado para localização de estradas florestais usando SIG e AHP simultaneamente. Os critérios utilizados na localização de estradas foram declive, tipo de solo, geologia, redes hidrográficas, aspectos, volume de árvores m³ por hectare, tipo de árvore e mapas de elevação. Conforme os autores, este estudo mostra que o uso do método AHP e GIS representa uma solução acertada e ajustada para planejamento da rede de estradas florestais.

Abdi et al., (2009), desenvolveram um método utilizando AMC-SIG para projetar uma rede de estradas florestais com o menor custo de construção, mantendo requisitos técnicos. O grupo de tomada de decisão identificou seis fatores como sendo relevantes para os custos de construção de estradas florestais: inclinação, solo, geologia, aspecto, altitude e volume em pé.

Como pode ser observado no contexto das estradas florestais são considerados um grande número de variáveis (critérios), fazendo com que essas abordagens metodológicas seja cada vez mais utilizadas no planejamento florestal.

3.4.3. Técnicas e ferramentas utilizadas na análise multicritério

Problemas de decisão espacial que envolvem um grande número de alternativas viáveis e critérios múltiplos, muitas vezes conflitantes e incomensuráveis, são complexos e desafiadores. Esses problemas são frequentemente encontrados em diversos campos, como planejamento urbano, gestão de recursos naturais, desenvolvimento regional e muito mais. A AMC baseada em SIG é uma abordagem que integra técnicas de análise multicritério com dados geoespaciais e informações de um SIG para resolver esses problemas (MALCZEWSK, 2006).

Para o mesmo autor, na AMC diferentes metodologias podem ser aplicadas em ambiente SIG. Embora existam vários métodos para estimativa de critérios de decisão, o AHP (Analytic

Hierarchy Process) é um dos mais populares, devido à sua simplicidade e flexibilidade (VILELA 2019). É um instrumento de apoio à decisão baseado em matemática e psicologia amplamente utilizado e que foi desenvolvido na década de 70 pelo professor Thomas L. Saaty.

Ho 2008 aponta que “o método AHP consiste em três operações principais, incluindo a construção de hierarquia, análise de prioridade e verificação de consistência”. Por se tratar de um método que é empregado para a resolução de problemas complexos que envolve grande quantidade de variáveis, ele busca resolver essa complexibilidade hierarquizando o problema, ou seja, dividindo-o em subproblemas, que podem ainda ser subdivididos de forma que se tornem menores e mais simples. De acordo com Marins, Souza e Barros (2009) colocar o problema estruturado em níveis hierárquicos, deixa o método mais fácil de ser compreendido. Na figura 1 observa-se a estrutura básica da Hierarquia de Decisão do método AHP.

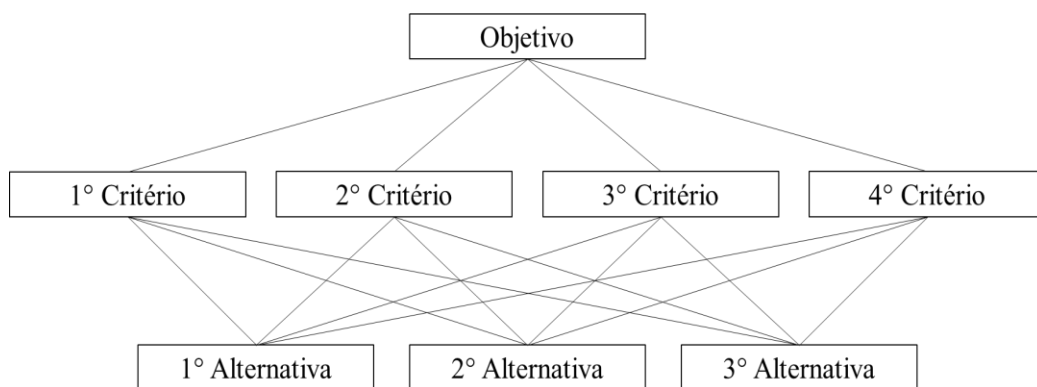


Figura 1. Estrutura Básica da Hierarquia de Decisão do método AHP.

Para Saaty (1990) é extremamente importante a etapa de estruturação do problema e construção da hierarquia, pois assim será possível realizar o processo de comparação dos critérios e em seguida das alternativas.

Após a hierarquização do problema é feita a atribuição de pesos para cada critério de acordo com a sua importância em relação ao que está sendo tratado, ou seja, a análise de prioridade. Nesta etapa, é feita uma comparação pareada dos critérios estabelecendo assim o grau de significância de um em relação ao outro. O decisor emite sua preferência atribuindo um valor numérico a cada comparação. Os julgamentos podem ser emitidos, por exemplo, por especialistas da área. Eles também podem traduzir a opinião de um grupo de pessoas, neste caso, deve ser feita uma média de todas as opiniões expressas pelos membros do grupo (PIMENTA et al., 2019). O julgamento deve ser fundamentado na escala proposta por Saaty (1983) conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Escala numérica de Saaty.

| Escala | Definição | Explicação |
|---------------|--|---|
| 1 | Ambos os elementos são de igual importância | Ambos os elementos contribuem com a propriedade de igual forma |
| 3 | Moderada importância de um elemento sobre o outro | A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro |
| 5 | Forte importância de um elemento sobre o outro | Um elemento é fortemente favorecido |
| 7 | Muito forte a importância de um elemento sobre o outro | Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro. |
| 9 | Extrema importância de um elemento sobre o outro | Um elemento é favorecido pelo menos com uma ordem de magnitude de diferença |

| | | |
|-------------------|--|--|
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermediários entre as opiniões | Usados como valores de consenso entre as opiniões. |
|-------------------|--|--|

Fonte: Adaptado de Saaty (1983).

O decisor busca primeiramente o julgamento conceitual e, em seguida, faz a associação com os valores da escala numérica com o intuito de registrá-lo na matriz de comparação (RIBEIRO e ALVES, 2016). Sendo assim, a partir dos dados fornecidos pelo decisor é construída a matriz de comparação pareada, também chama de matriz de julgamentos. A Tabela 2 exemplifica a aplicação e construção da matriz.

Tabela 2. Matriz de comparação pareada ou matriz de julgamentos.

| | Critério A | Critério B | Critério C | Critério D |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Critério A | 1 | 3 | 9 | 5 |
| Critério B | 1/3 | 1 | 4 | 7 |
| Critério C | 1/9 | ¼ | 1 | 3 |
| Critério D | 1/5 | 1/7 | 1/3 | 1 |

Fonte: Adaptado de Saaty (1983)

Na construção do julgamento, é feita a comparação de cada elemento da linha com cada elemento da coluna e registra-se o valor do julgamento na matriz na posição linha e coluna relativos aos elementos comparados (SAATY, 1983). Segundo Ribeiro e Alves (2016) “na comparação entre os dois elementos, deve-se levar em conta qual o elemento mais importante à luz do critério foco e a intensidade dessa importância”.

Como as comparações são realizadas através de julgamentos subjetivos, corre-se o risco de haver algum grau de inconsistência. Pimenta et al. (2019) trazem que “a consistência é importante, porque a baixa consistência pode ser um sintoma de julgamentos aleatórios”.

O cálculo da Razão de Consistência (RC) é obtido pela fórmula:

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

Onde: CR = Razão de Consistência; IR = Índice de Consistência Randômico; IC = Índice de Consistência (IC).

Caso a RC calculada seja menor ou igual a 0,10, a matriz de julgamento é considerada consistente. Do contrário, a matriz é tida como inconsistente, devendo o julgamento ser refeito (SAATY, 1983).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo selecionada compreende a Fazenda Santa Cecília, localizada no município de Apiaí, na região sul do estado de São Paulo, entre as coordenadas geográficas 24°24'59,22"S e 48°50'19,22"O. A fazenda possui uma extensão territorial de 979,97 ha, ocupada predominantemente por plantações de pinus (*Pinus taeda* L.), destinada ao abastecimento da indústria de serraria. A região possui um clima classificado como Cfb, de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado por ausência de estação seca, verões frescos e invernos com ocorrência frequente de geadas severas (Alvares et al., 2013). A temperatura média anual é de 18°C e a precipitação média anual é de 1.639 mm. A fazenda apresenta uma variação de altitude de 903 a 1068 msnm. Quanto à vegetação, é caracterizada como Floresta Ombrófila Mista, segundo IBGE (1992), e o solo como Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos, conforme a(EMBRAPA, 2011).

4.2. Obtenção das imagens de satélite e dados vetoriais

A obtenção dos dados utilizados neste estudo envolveu a compilação de sete critérios consideradas preeminentes para a delimitação de zonas críticas para a alocação de estradas florestais. Esses critérios abrangeram o uso e ocupação do solo, temperatura, hipsometria, declividade, orientação de vertentes, distância ao fluxo acumulado de água e erodibilidade do solo (fator K).

Para a construção desses critérios, foram empregadas imagens orbitais provenientes dos satélites Landsat 8, equipado com os sensores Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS), e Planet, que carrega a bordo um sensor multiespectral com quatro bandas do espectro eletromagnético: 455–515 nm (Azul), 500–590 nm (Verde), 590–670 nm (Vermelho) e 780–860 nm (Infravermelho próximo), com resolução espacial de 30 e 3 metros, respectivamente. Essas imagens foram adquiridas por meio do site do United States Geological Survey (USGS). Além disso, dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus DEM GLO-30, oriundos da missão TanDEM-X em conjunto com a Airbus, com resolução espacial de 30 m, foram obtidos através da Agência Espacial Europeia (ESA).

Também foram utilizados os mapas de teor de areia, silte e argila do solo do Brasil, na profundidade de 0-30 cm, com resolução espacial de 90 m. Esses mapas foram produzidos como parte integrante do Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil

(PronaSolos) e foram financiados pelo projeto Embrapa 10.18.03.024.00.00, intitulado "Mapas Nacionais de Atributos do Solo: Contribuição ao PronaSolos, GlobalSoilMap e Aliança Mundial pelo Solo".

Outros planos de informação, como o limite da propriedade e dados do cadastro florestal, foram disponibilizados pela Fazenda Santa Cecília no formato vetorial (.SHP). Para o processamento e produção dos mapas temáticos (critérios), foi utilizado o *softwar* QGIS 3.28. As imagens raster e os arquivos vetoriais foram reprojitados para o Sistema de Projeção Universal Transversa de Mercador (UTM), no fuso 22 Sul, com datum SIRGAS 2000. Esse procedimento garantiu a consistência e a coerência espacial dos dados, facilitando a análise e a integração dos critérios utilizados na avaliação multicritério.

4.3. Elaboração de mapa com zonas críticas para alocação de estradas

4.3.1 Confecção de mapas temáticos (critérios)

4.3.1.1 Uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado com o objetivo de analisar o estado ocupacional da Fazenda Santa Cecília. Para esse fim, foi utilizado uma imagem orbital proveniente do satélite Planet, datada em 10 de dezembro de 2022. Na etapa inicial, as bandas espectrais foram combinadas por meio da ferramenta "Raster" > "Miscelânea" > "Compor Bandas (RGB)" do software QGIS 3.28. Duas composições de banda foram geradas: cor natural (RGB - 321) e falsa cor (RGB - 342). Essas composições auxiliaram na diferenciação das diversas classes de uso e ocupação do solo, tais como: hidrografia, edificações, redes elétricas, estradas florestais, vegetação nativa, área úmida e plantio florestal. A fim de obter as classes de uso e ocupação do solo, foi realizada a vetorização poligonal manual em tela (heads-up), utilizando as composições coloridas como pano de fundo. Além disso, foi realizada uma verificação de campo na área de estudo, a fim de melhorar a acurácia da classificação e validar os dados obtidos.

4.3.1.2. Temperatura

Para a elaboração do mapa de temperatura foi empregada a banda 10 do sensor OLI/TIRS do do satélite *Landsat 8*, que abrange a região termal do espectro eletromagnético datada em 02 de fevereiro de 2023, corresponde ao período mais chuvoso. Para obter a temperatura em graus Celsius, foram realizadas duas etapas de conversões. Inicialmente, as temperaturas representadas em níveis de cinza foram convertidas em radiância espectral, seguida da conversão para graus Celsius utilizando as equações 2 e 3, respectivamente (Landis e Koch, 1977).

$$L\lambda = ML \cdot Q_{\text{Cal}} + A_L \quad (2)$$

Onde: $L\lambda$ = Radiância espectral ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$); ML = Fator multiplicativo de redimensionamento de banda; Q_{cal} = Valor quantificado e calibrado do pixel em nível de cinza (DN); A_L = Fator de redimensionamento de banda aditiva.

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right) - K} \quad (3)$$

Onde: T = Temperatura (°C); K1 = Constante de calibração 1; K2 = Constante de calibração 2; Lλ = Radiância espectral (W/m² · sr · μm); K = Constante de temperatura em graus Kelvin (273,15).

Após a aplicação dessas equações, foram obtidas as temperaturas correspondentes a cada pixel da imagem, fornecendo informações sobre a distribuição térmica na área de estudo.

4.3.1.3. Hipsometria

O mapa de hipsometria foi gerado utilizando dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus DEM GLO-30, correspondente à área de estudo. Em seguida, por meio do algoritmo *r.reclass* do software GRASS, o mapa de hipsometria foi reclassificado em 5 classes distintas.

A reclassificação da hipsometria permite a identificação e delimitação das diferentes faixas altimétricas presentes na área de estudo. Essas classes representam intervalos de altitudes e são úteis para analisar a variação do relevo, identificar áreas de maior ou menor altitude e compreender a topografia da região de interesse.

4.3.1.4. Declividade

O mapa de declividade foi gerado a partir dos dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus DEM GLO-30, utilizando a ferramenta de análise de dados raster *Slope* da biblioteca GDAL. A declividade foi expressa em porcentagem, e representa a taxa de variação da elevação do terreno em relação à distância horizontal.

Posteriormente, o mapa de declividade foi reclassificado utilizando o algoritmo *r.reclass* do software GRASS, de acordo com as classes propostas pela Embrapa (1976), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Classificação do relevo de acordo com as classes de declividade.

| Declividade (%) | Discriminação do relevo |
|------------------------|--------------------------------|
| 0 – 3 | Plano |
| 3 – 8 | Suave ondulado |
| 8 – 20 | Ondulado |
| 20 – 45 | Forte ondulado |
| 45 – 75 | Montanhoso |
| > 75 | Forte montanhoso |

Fonte: EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10.

4.3.1.5. Orientação de vertentes

O mapa de orientação de vertentes foi obtido em ângulo trigonométrico utilizando os dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus DEM GLO-30. A ferramenta de análise de dados raster *Aspect*, disponível na biblioteca GDAL, foi empregada para gerar o mapa de orientação de vertentes. Posteriormente, o mapa foi reclassificado utilizando o algoritmo *r.reclass* do software GRASS. A reclassificação foi realizada considerando os quatro pontos cardeais e seus intermediários, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Classificação da orientação de vertentes.

| Orientação (graus) | Discriminação do relevo |
|---------------------------|--------------------------------|
| 0 - 22.5 | Norte |
| 22.5 - 67.5 | Nordeste |
| 67.5 - 112.5 | Leste |
| 112.5 - 157.5 | Sudeste |
| 157.5 - 202.5 | Sul |
| 202.5 - 247.5 | Sudoeste |
| 247.5 - 292.5 | Oeste |
| 292.5 - 337.5 | Noroeste |
| 337.5 - 360 | Norte |

Fonte: Autor, (2023).

4.3.1.6. Distância vertical ao fluxo acumulado de água

O mapa de distância vertical ao fluxo acumulado de água foi gerado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus DEM GLO-30. Inicialmente, realizou-se o reparo de descontinuidades no terreno causadas por depressões utilizando o algoritmo *r.fill.dir* do software GRASS, conforme descrito por Capoane e Silva (2020). Em seguida, foram criadas as superfícies de direção de fluxo e fluxo de água acumulado utilizando o comando *r.watershed*. O método “D8” proposto por O'Callaghan e Mark (1984), foi adotado para atribuir a direção do fluxo de um pixel a um de seus oito vizinhos, com base na diferença de altura ponderada pela distância entre eles. Após a geração do fluxo acumulado, a distância vertical ao fluxo acumulado de água foi obtida utilizando o algoritmo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) do complemento *PCRaster Tools*.

4.3.1.7. Erodibilidade (Fator K)

O mapa de erodibilidade (Fator K) foi desenvolvido a partir dos mapas de teor de areia, silte e argila do solo do Brasil. Para extrair os valores desses teores, foi utilizado o limite da área de estudo em um ambiente SIG. Posteriormente, foi realizado o georreferenciamento do ponto central de cada pixel, e, por meio do complemento “*Point sampling tool*”, procedeu-se à extração dos valores dos teores de areia, silte e argila. Em seguida, efetuou-se a conversão da unidade de medida de g/kg para %, e os novos valores foram importados para o software SIG. Nesse ambiente, realizou-se uma análise de interpolação espacial utilizando o método de krigagem ordinária por meio do complemento “*smart-map*”, resultando na reprojeção dos mapas para uma resolução espacial de 10 metros. Após a reprojeção, os mapas de teor de areia, silte e argila foram utilizados para calcular o Fator K, empregando a calculadora raster do software SIG. O cálculo do Fator K seguiu a equação 4 proposta por Bouyoucos (1935), considerando os teores de areia, silte e argila.

$$\text{Fator K} = \frac{(\%areia + \%silte)}{\%argila} \times \frac{100}{100} \quad (4)$$

Onde: Fator K = erodibilidade do solo ($t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$); %Areia, % Silte e % Argila = porcentagens das respectivas frações.

4.3.2. Zoneamento de criticidade para alocação de estradas

O mapa de zonas críticas para alocação de estradas foi gerado por meio da multiplicação dos critérios: uso e ocupação do solo, temperatura, hipsometria, declividade, orientação de vertentes, distância ao fluxo acumulado de água e erodibilidade do solo (fator K). Para essa análise, foi adotado o método de Combinação Linear Ponderada (CLP). De acordo com Valente e Vettorazzi (2013), o método CLP é amplamente utilizado na Análise Multicritério devido à sua simplicidade de aplicação e os bons resultados que proporciona.

Para utilizar o método CLP, é necessário atender às seguintes premissas: (i) realizar a normalização dos critérios e; (ii) definir os pesos ponderados e a ordem de importância relativa dos critérios.

4.3.2.1. Normalização dos critérios

A normalização dos critérios foi efetuada em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando uma escala padronizada que varia de 1 a 5. Durante esse procedimento, as localidades identificadas como mais críticas, com base nos critérios analisados, foram associadas aos valores mais altos na escala, ou seja, 5. Essa abordagem permite destacar e atribuir maior importância ou criticidade às áreas consideradas mais relevantes em relação aos critérios específicos em avaliação.

4.3.2.2. Hierarquização e ponderação dos critérios

A atribuição de peso ponderado é fundamental para indicar a importância dos critérios no mapeamento. A fim de obter esse conjunto de pesos, os critérios foram classificados com base em sua importância relativa para o mapeamento. Para realizar essa classificação, foi aplicada a lógica de Comparação Pareada, desenvolvido por Saaty (1977), por meio do método Processo Analítico Hierárquico (AHP). Neste método, os diferentes critérios que influenciam a tomada de decisão são comparados dois a dois, e um valor de julgamento é atribuído à relação entre eles, utilizando uma escala pré-definida (Saaty, 1983). A definição dos valores de importância entre os critérios é utilizada como entrada na matriz de comparação pareada, a partir da qual os pesos ponderados dos fatores são calculados (Júnior e Rodrigues, 2012). Para

realizar a hierarquização e ponderação dos critérios dos critérios, foram realizadas consultas com à literatura e a especialistas da área para embasar as decisões tomadas.

4.3.2.3. Agregação dos critérios

Os critérios normalizados foram combinados utilizando o método CLP (Combinação Linear Ponderada). De acordo com esse método, os mapas foram multiplicados pixel a pixel pelos seus respectivos pesos ponderado e os resultados foram somando, conforme indicado na equação 9. Está operação foi realizada utilizando a álgebra de mapas por meio da calculadora raster.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i X_i \cdot \prod_{j=1}^k c_j \quad (9)$$

Onde: S = valor final do *score*; w_i = Peso ponderado i; n: número de critérios; X_i = Registro do critério para o fator i; c_j = Registro do critério para a restrição j; k: número de parâmetros de exclusão e Π = Produto.

Em seguir, o mapa de criticidade resultante foi reclassificado em cinco classes: Muito baixo; Baixo; Moderado; Alto e Extremo. Essa reclassificação foi realizada para obter diferentes níveis de criticidade. Posteriormente, o mapa de estradas foi sobreposto ao mapa de criticidade, permitindo avaliar o nível de criticidade associado a cada trecho de estrada.

4.4. Alocação de estradas florestais

Após a elaboração e validação do mapa de zonas críticas para a localização de estradas florestais, utilizando o algoritmo *r.reclass* do software GRASS, foi realizada uma reclassificação. Para cada classe (Muito baixo; Baixo; Moderado; Alto; Extremo), foi atribuído um peso de adequação em uma escala de variação de 1 a 5. Os maiores pesos foram atribuídos às zonas onde as estradas não devem ser construídas.

Em seguida, para analisar o caminho de menor custo, foram definidos dois pontos: origem e destino, para determinar a melhor rota para alocação de estradas florestais. Esse procedimento foi realizado por meio do complemento *Cost distance analysis*, utilizando o

algoritmo *Least Cost Path*.

4.5. Validação para a alocação de estradas florestais

A fim de verificar e validar a eficiência do algoritmo "*Least Cost Path*", foram realizados testes de confiabilidade dos resultados. Para isso, foi previamente definida uma estrada que conecta os dois pontos no terreno, para comparar os resultados obtidos pelo algoritmo com a rota pré-estabelecida, a fim de avaliar a precisão e a exatidão da alocação das estradas florestais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Critérios avaliados

A Tabela 5 apresenta os critérios reclassificados, seus coeficientes correspondentes e as variações mínima e máxima observadas para cada critério.

Tabela 5. Critérios reclassificados e coeficientes associados para avaliação de risco na alocação de estradas florestais.

| Risco de alocar as estradas | Coeficiente | Classe |
|--|--------------------|-------------------|
| Uso e ocupação do solo | | |
| Muito baixo | 1 | Area Construída |
| Baixo | 2 | Floresta Plantada |
| Moderado | 3 | Floresta Nativa |
| Alto | 4 | Area Úmida |
| Extremo | 5 | Hidrografia |
| Altimetria (m): 907,13812 – 1072,54312 | | |
| Muito baixo | 1 | >1039,46 |
| Baixo | 2 | 1006,38 – 1039,46 |
| Moderado | 3 | 973,30 – 1006,38 |
| Alto | 4 | 940,22 – 973,30 |
| Extremo | 5 | <940,22 |
| Declividade (%): 0,058724 – 73,2219 | | |
| Muito baixo | 1 | < 14,69 |
| Baixo | 2 | 14,69 – 29,32 |
| Moderado | 3 | 29,32 – 43,96 |
| Alto | 4 | 43,96 – 58,59 |
| Extremo | 5 | > 58,59 |
| Temperatura (°C): 19,7715 – 23,1600 | | |

| | | |
|---|---|---------------------|
| Muito baixo | 1 | > 23,16 |
| Baixo | 2 | 22,03 – 23,16 |
| Moderado | 3 | 20,90 – 22,03 |
| Alto | 4 | 19,77 – 20,90 |
| Extremo | 5 | < 19,77 |
| Fator K: 0,0153 – 0,0187 | | |
| Muito baixo | 1 | < 0,0160 |
| Baixo | 2 | 0,0160 - 0,0167 |
| Moderado | 3 | 0,0167 - 0,0173 |
| Alto | 4 | 0,0173 - 0,0180 |
| Extremo | 5 | > 0,0180 |
| Distância vertical de fluxo de água: -6,92982 – 102,517 | | |
| Muito baixo | 1 | > 80,63 |
| Baixo | 2 | 58,74 - 80,63 |
| Moderado | 3 | 36,85 - 58,74 |
| Alto | 4 | 14,96 - 36,85 |
| Extremo | 5 | <14,96 |
| Orientação de vertentes: 0 – 360° | | |
| Muito baixo | 1 | Norte |
| Baixo | 2 | Nordeste e Noroeste |
| Moderado | 3 | Leste e Oeste |
| Alto | 4 | Sudeste e Sudoeste |
| Extremo | 5 | Sul |

Na Figura 3, é possível visualizar os valores padronizados de cada critério de acordo com sua natureza quantitativa ou qualitativa

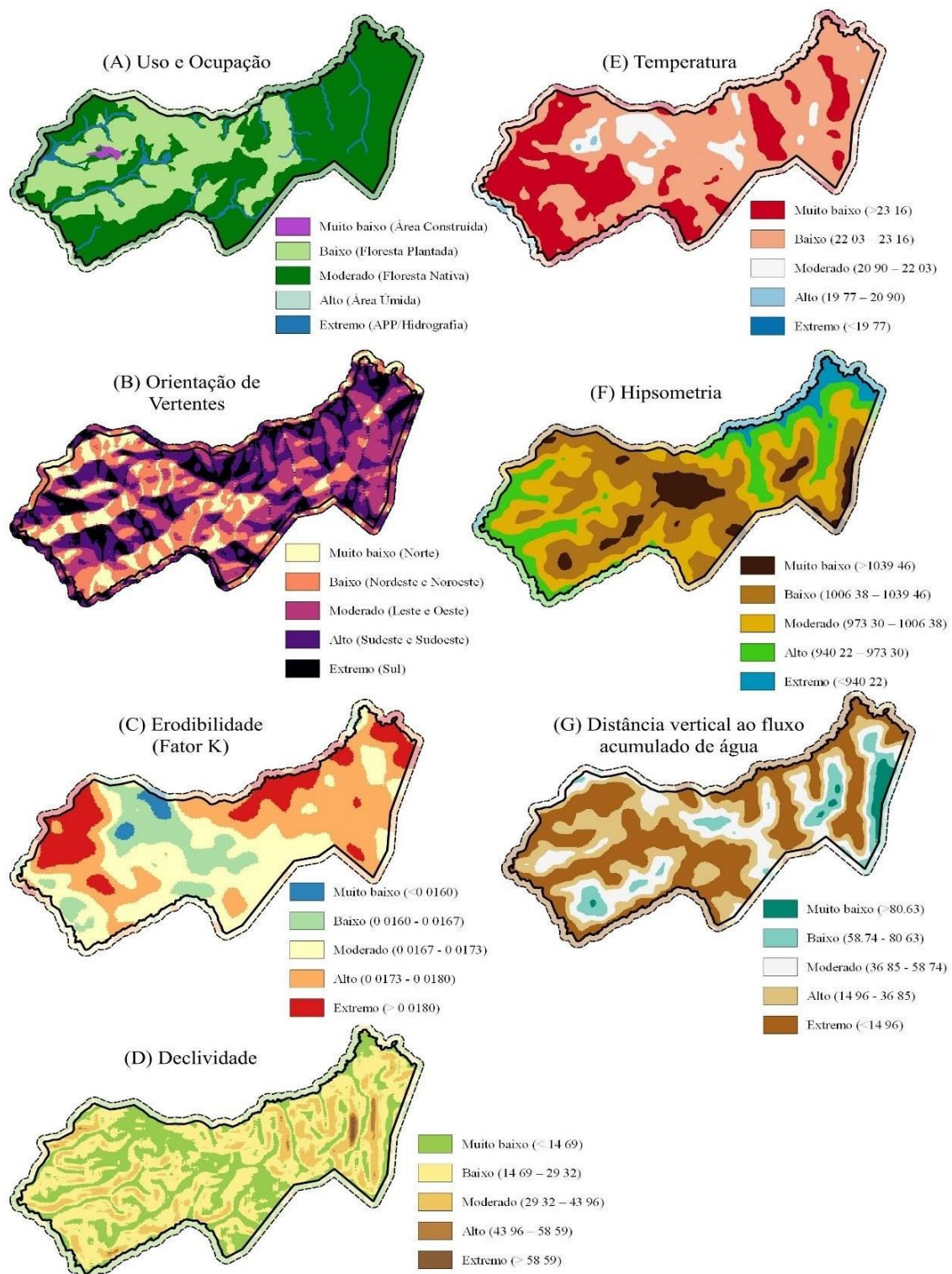


Figura 3. Classificação dos critérios: (A) Uso e ocupação do solo; (B) Declividade; (C) Erodibilidade (Fator K); (D) Distância vertical ao fluxo acumulado de água; (E) Orientação da vertentes; (F) Temperatura e (G) Hipsometria.

5.2. Matriz de comparação pareada utilizando o método AHP

O peso do fator (pf) é um indicador da relevância dos critérios no âmbito do mapeamento. Para determinar esses pesos, os critérios foram inicialmente classificados, considerando sua importância relativa para o mapeamento. Revisões da literatura resultaram na identificação do uso e ocupação do solo como o critério predominante, seguido por declividade, erodibilidade, distância ao fluxo acumulado, orientação de vertentes, temperatura e hipsometria. Na Tabela 6, são apresentados os resultados ponderados pelos critérios selecionados na análise AHP, derivados das comparações paritárias. Esses pesos foram determinados pelo principal autovetor da matriz de decisão, refletindo as contribuições relativas de cada critério com base nas 21 comparações realizadas ao longo do processo. Cabe salientar que a Razão de Consistência (RC) obtida da matriz de comparação no método AHP, foi de 0,013, o que sugere que as comparações realizadas são razoavelmente consistentes, permitindo a utilização dos pesos atribuídos aos critérios. Junior e Rodrigues, (2012) trazem que valores de RC próximos a zero indicam uma boa consistência, enquanto valores mais altos podem apontar para inconsistências nas comparações paritárias.

Tabela 6. Matriz de comparação pareada entre os mapas de critérios.

| Classes | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | PF (%) |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| 1 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 29.70 |
| 2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 23.00 |
| 3 | 0.50 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 16.60 |
| 4 | 0.33 | 0.50 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 11.60 |
| 5 | 0.25 | 0.33 | 0.50 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 9.60 |
| 6 | 0.20 | 0.25 | 0.33 | 0.50 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 5.30 |
| 7 | 0.17 | 0.20 | 0.25 | 0.33 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 4.30 |

Razão de Consistência (RC) = 0,013

Onde: PF - peso de fator; 1 - Uso e ocupação do solo; 2 - Declividade; 3 - Erodibilidade (Fator K); 4 - Distância vertical ao fluxo acumulado de água; 5 - Orientação da vertentes; 6 - Temperatura e 7 - Hipsometria.

De acordo com Bugday, (2018) o mapa de uso e ocupação do solo desempenha um papel vital na determinação de áreas críticas para a alocação de estradas florestais, influenciando significativamente na avaliação e no planejamento dessas estradas. A natureza do uso do solo em uma dada área tem implicações diretas na infraestrutura necessária e no planejamento de acessibilidade.

Segundo Çalışkan (2013), a declividade é um dos principais fatores a serem considerados no planejamento da rede de estradas florestais, impactando diretamente outros fatores, como erodibilidade e escoamento superficial, ambos correlacionados com o gradiente de inclinação do terreno.

A erodibilidade do solo é mais influenciada pela declividade, características das chuvas, cobertura vegetal e manejo do que pelas propriedades intrínsecas do solo, sendo um fator crucial para a erosão em estradas florestais, conforme destacado por Parsakhoo et al. (2016). A erosão superficial do solo aumenta especialmente em terrenos com alta declividade.

De acordo com O'callaghan e Mark (1984) a distância vertical ao fluxo acumulado de água é fundamental devido à sua influência na drenagem, estabilidade do solo e impactos ambientais. A proximidade da água afeta diretamente a erosão do solo e representa um fator crítico para a construção e manutenção de estradas. Sua avaliação é essencial para identificar áreas com desafios de acessibilidade e construção de estradas, integrando-se a outros fatores determinantes na alocação de estradas na região de estudo.

A orientação de vertentes reflete a umidade presente no solo, resultante da incidência da radiação solar e do fluxo de água pelo terreno, conforme mencionado por Bispo et al. (2010).

A temperatura da superfície terrestre é um parâmetro físico que diz respeito ao fluxo de calor dado em função do balanço de radiação que chega e que sai de um corpo. Além de estudos de cunho climático, a temperatura, por ser bastante sensível a umidade do solo. (ARANTES, et al., 2013) Portanto, áreas expostas a temperaturas mais elevadas tendem a um aceleração da evaporação da água no solo, resultando em condições mais secas.

A topografia da região pode influenciar a acessibilidade, custos de construção e eficiência da estrada. Para Fernandes et al. (1995) a escolha ideal para a construção de uma estrada é preferencialmente nos divisores de água. Essa decisão é motivada pela redução da necessidade de estruturas especiais de drenagem, resultando em economia significativa nos custos tanto de construção quanto de manutenção.

5.3. Mapa de criticidade para estradas florestais

A Tabela 7 apresenta uma análise detalhada da distribuição das áreas conforme as classes de criticidade das estradas florestais. Destaca-se que a maior parte da área de estudo, representando 73,59%, está classificada como moderada em termos de criticidade.

As classes Baixo e Alto compreendem, respectivamente, 16,33% e 10,06% da área, enquanto a classe Extremo representa uma proporção mínima de 0,03%. Essa distribuição percentual oferece insights sobre a extensão relativa das áreas críticas, podendo extrair informações que podem auxiliar nas decisões estratégicas relacionadas ao planejamento e gestão de estradas florestais. A concentração significativa na classe Moderado destaca a importância de medidas específicas para lidar com essa categoria predominante.

Tabela 7. Distribuição de áreas por classes de criticidade na alocação de estradas florestais.

| Classes | ha | (%) |
|----------|--------|-------|
| Baixo | 159,99 | 16,33 |
| Moderado | 721,15 | 73,59 |
| Alto | 98,56 | 10,06 |
| Extremo | 0,28 | 0,03 |

Pode-se observar, a partir da Tabela 7, que as classes Moderado e Alto juntas representam uma porcentagem significativa da área total, totalizando 83,65. Essas áreas, embora variem em intensidade de criticidade, compartilham a característica de exigir uma atenção estratégica e medidas específicas durante o planejamento e gestão de estradas florestais. Essa concentração expressiva em áreas de moderada a alta criticidade ressalta a importância de uma abordagem diferenciada para essas regiões. Estratégias de mitigação de riscos, monitoramento intensivo e implementação de práticas sustentáveis podem ser especialmente relevantes nessas áreas críticas. Além disso, ao direcionar recursos e esforços para essas zonas de maior criticidade, é possível otimizar as ações de planejamento, promovendo uma gestão eficaz e sustentável das estradas florestais na área de estudo.

O mapa de criticidade para a alocação de estradas florestais, representado pela Figura 4, foi gerado por meio da integração dos mapas de critérios utilizando o método CLP de AMC. Este mapa abrange uma variação de 1,65 a 4,74 unidades, refletindo diferentes níveis de criticidade na área de estudo, desde Baixo até Extremo. O mapa de criticidade utiliza uma variação de cores para representar diferentes níveis de criticidade na alocação de estradas florestais. A escala de cores abrange do verde ao amarelo e vermelho, onde cada cor está associada a um intervalo específico de valores. No esquema de cores adotado, o verde indica valores mais baixos de criticidade, representando áreas de menor preocupação. À medida que a tonalidade se desloca para o amarelo e, posteriormente, para o vermelho, há um aumento progressivo nos níveis de criticidade, sinalizando áreas com maior importância estratégica ou

risco. Essa codificação cromática proporciona uma representação visual clara da distribuição de criticidade, facilitando a identificação e a interpretação das áreas mais críticas no contexto do planejamento e gestão de estradas florestais.

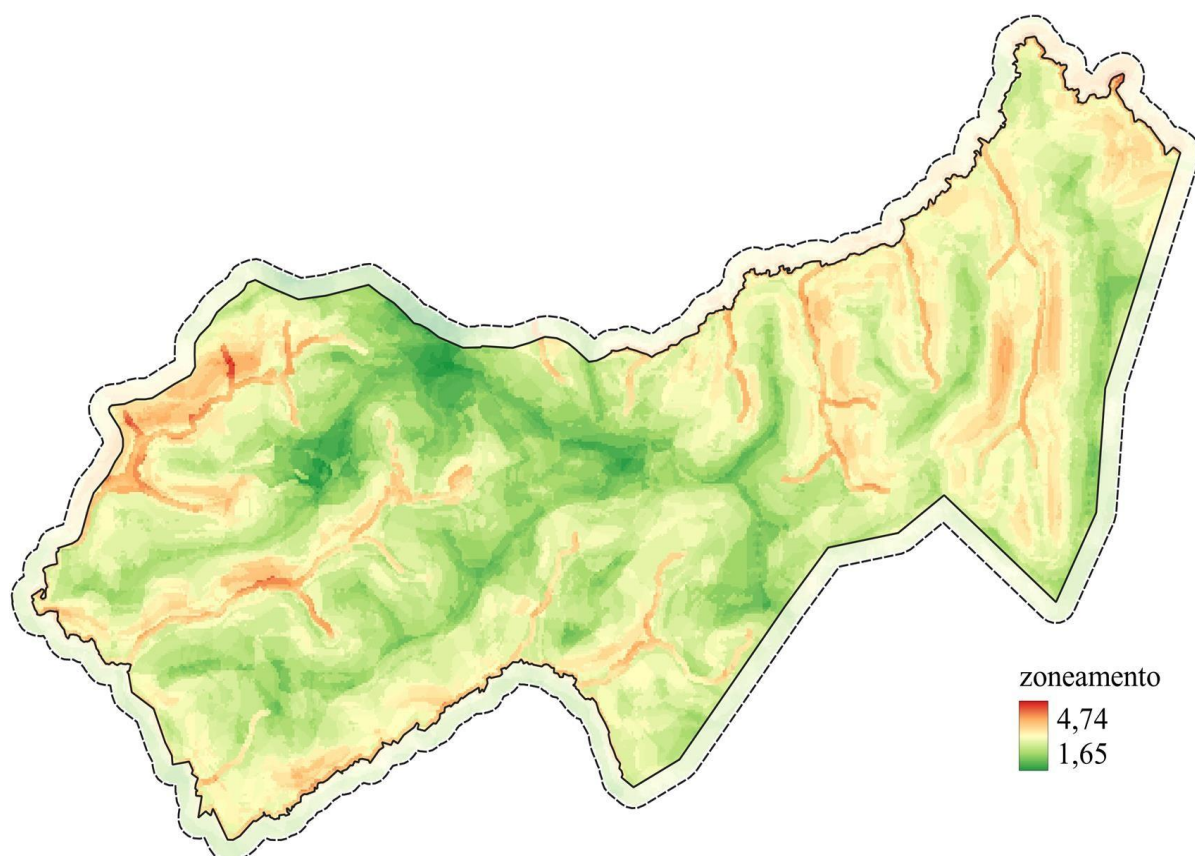


Figura 4. Mapa de criticidade para alocação de estradas florestais.

Na Figura 5 é apresentado o mapa de criticidade reclassificado, oferecendo uma visão mais refinada da distribuição dos níveis de criticidade para a alocação de estradas florestais. Ao analisar esta figura em conjunto com os dados apresentados na Tabela 7, torna-se evidente como a reclassificação contribui para uma compreensão mais detalhada das características críticas das estradas florestais. Além disso, a Figura 5 é interativa, e permite não apenas uma visualização detalhada, mas também a capacidade de agrupar as classes de criticidade e realizar cálculos de área. Essa funcionalidade é importante para a determinação precisa das extensões de áreas críticas, facilitando a tomada de decisões baseada em dados sólidos.

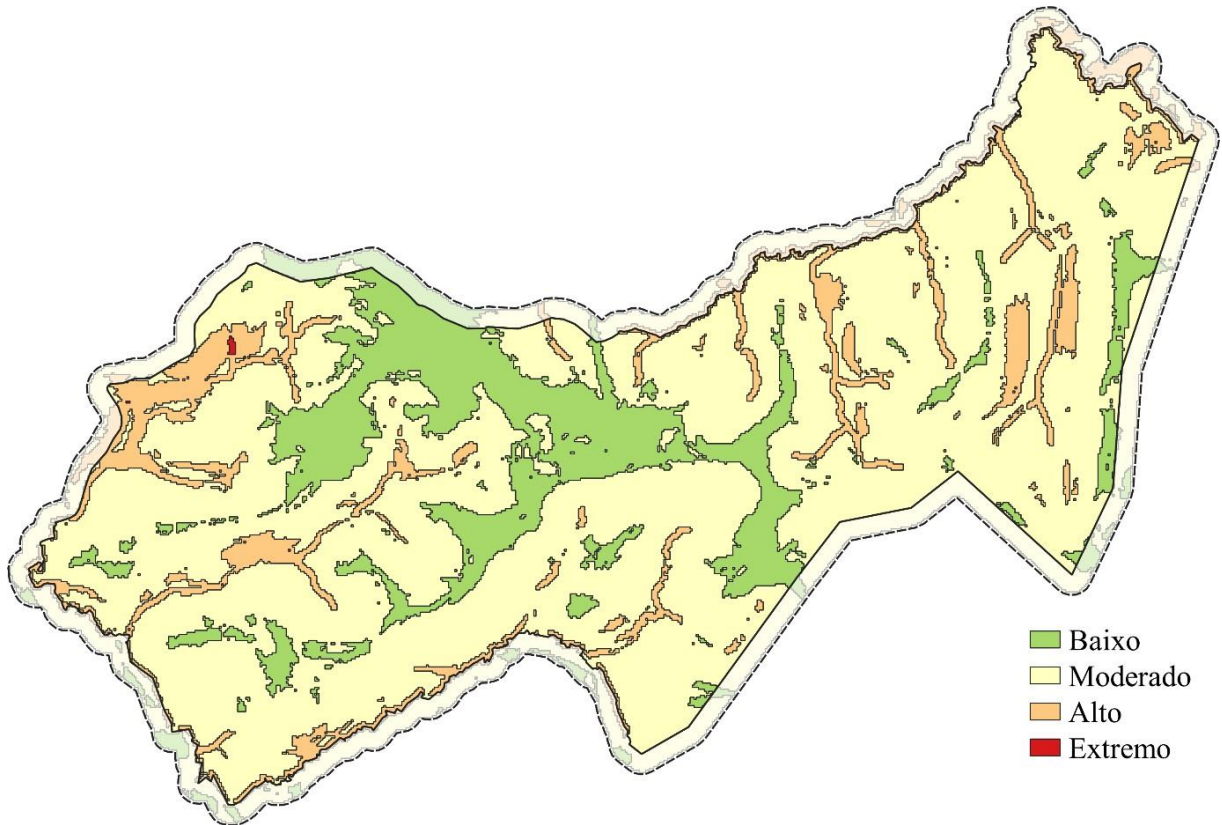


Figura 5. Mapa de criticidade reclassificado para alocação de estradas florestais.

Com base nessa reclassificação, torna-se possível visualizar não apenas a distribuição de criticidade, mas também a proporção ocupada por cada área na Figura 5. Essa visualização detalhada oferece informações significativas sobre a extensão relativa das classes de criticidade, permitindo uma compreensão mais profunda da paisagem de riscos nas estradas florestais. Essa abordagem dinâmica e interativa não apenas melhora a eficácia da análise, mas também capacita os tomadores de decisão com ferramentas precisas para identificar áreas de foco e otimizar estratégias de gestão.

É importante notar a ausência da classe Muito Baixa, indicando que a área de estudo não apresenta áreas com risco mínimo. Essa observação tem implicações importantes para a gestão, uma vez que destaca a necessidade de atenção e intervenção mesmo em áreas que podem ser consideradas moderadamente críticas. Esta análise é essencial para orientar decisões estratégicas, permitindo a alocação eficiente de recursos e a implementação de medidas específicas em áreas que demandam uma atenção mais cuidadosa. A Figura 5, portanto, desempenha um papel crucial na tradução dos dados brutos em informações acionáveis para a gestão eficaz do sistema viário florestal na área de estudo.

A presença predominante da categoria Moderada na concentração de áreas é uma característica distintiva do método CLP, conforme discutido por Malczewski (2000) e Malczewski, et al., (2003). Autores, como Boroushaki e Malczewski (2008), e Valente e Vettorazzi (2017), têm destacado consistentemente a propensão dos mapas gerados pelo método CLP para a generalização, resultando em uma porcentagem significativa de áreas categorizadas como de prioridade média. Essa inclinação à generalização implica que os mapas produzidos pelo método CLP frequentemente oferecem soluções que são percebidas como menos arriscadas no contexto do processo decisório.

Além disso, outra particularidade do método CLP é que, dependendo de como se decide o peso dos fatores e quão importantes eles são, o mapa final obtido destaca as características que têm mais influência (VETTORAZI e VALENTE, 2016). Essa flexibilidade na ponderação dos fatores introduz uma camada adicional de complexidade, permitindo que os usuários personalizem o mapa de criticidade com base em suas prioridades específicas.

Essas particularidades específicas do método CLP não apenas moldam a distribuição de criticidade que observamos nas estradas florestais, mas também destacam a importância de uma compreensão aprofundada dos princípios subjacentes a métodos de análise, como o CLP, ao interpretar e tomar decisões com base nos resultados apresentados.

5.4. Quantificação das estradas florestais em relação ao nível de criticidade

Na Tabela 8 é possível observar que as estradas principais e secundárias ocupam juntas uma área de 10 ha em relação a área total do estudo. Sendo 3,55 ha ocupadas por estradas primárias e 6,45 ha por estradas secundárias. Nota-se que do total de estradas primárias 64,68% encontram-se alocadas em áreas classificadas como Baixa criticidade e 34,39% em áreas classificadas como moderada criticidade, sendo apenas 0,93% em áreas de risco Alto. Já para as estradas secundárias 35,71% localizam-se em áreas de classe Baixa, 62,98% Moderada e 1,32% na classe de Alta criticidade.

Essas informações são essenciais para conduzir uma análise minuciosa da distribuição das estradas florestais em relação aos níveis de criticidade, com o propósito de orientar estratégias específicas de gestão e planejamento, sobretudo durante períodos críticos para o escoamento de madeira. A compreensão da concentração das estradas em diversas classes de criticidade possibilita uma abordagem proativa na tomada de decisões, direcionando ações e

investimentos para áreas mais críticas, visando otimizar o escoamento de madeira, reduzir impactos ambientais e fomentar uma gestão florestal eficiente.

Tabela 8. Quantificação das estradas florestais em relação ao nível de criticidade.

| Classes | Estrada principal | | Estrada secundaria | |
|----------|-------------------|-----------|--------------------|-----------|
| | Área em ha | Área em % | Área em ha | Área em % |
| Baixa | 2,30 | 64,68 | 2,30 | 35,71 |
| Moderado | 1,22 | 34,39 | 4,06 | 62,98 |
| Alto | 0,03 | 0,93 | 0,09 | 1,32 |
| Total | 3.55 | 100.00 | 6.45 | 100.00 |

Essas informações têm implicações diretas na otimização do escoamento de madeira e na promoção de uma gestão florestal eficiente. A concentração nas estradas principais de criticidade Baixa sugere que essas vias podem ser otimizadas para o transporte de madeira, beneficiando-se de uma menor complexidade logística e menor risco. Para as estradas secundárias, a atenção estratégica deve ser direcionada para áreas categorizadas como Moderado, onde uma concentração significativa é observada, indicando a necessidade de medidas específicas de gestão, manutenção e monitoramento para garantir um escoamento eficiente durante períodos críticos.

Ao direcionar esforços e recursos para áreas mais críticas, conforme identificado por essa análise, é possível otimizar não apenas o transporte de madeira, mas também mitigar impactos ambientais e promover uma gestão florestal sustentável. Essas informações oferecem, portanto, uma base sólida para a tomada de decisões proativas, orientando estratégias de gestão adaptadas às características específicas das estradas florestais na região de estudo.

A Figura 6 proporciona uma visão clara e intuitiva da disposição espacial das estradas em relação aos diversos níveis de criticidade. Essa representação visual aprimora significativamente a capacidade de compreensão e interpretação das informações, proporcionando uma visão eficaz da distribuição das estradas na área de estudo.

Essa abordagem visual não apenas facilita a compreensão, mas também se destaca como uma estratégia assertiva para identificar rotas eficientes na alocação de estradas florestais. A aplicação de um modelo de distribuição espacial em relação aos diferentes níveis de criticidade possibilita a identificação de rotas que, ao considerar fatores ambientais, promovem uma alocação mais sustentável e resiliente.

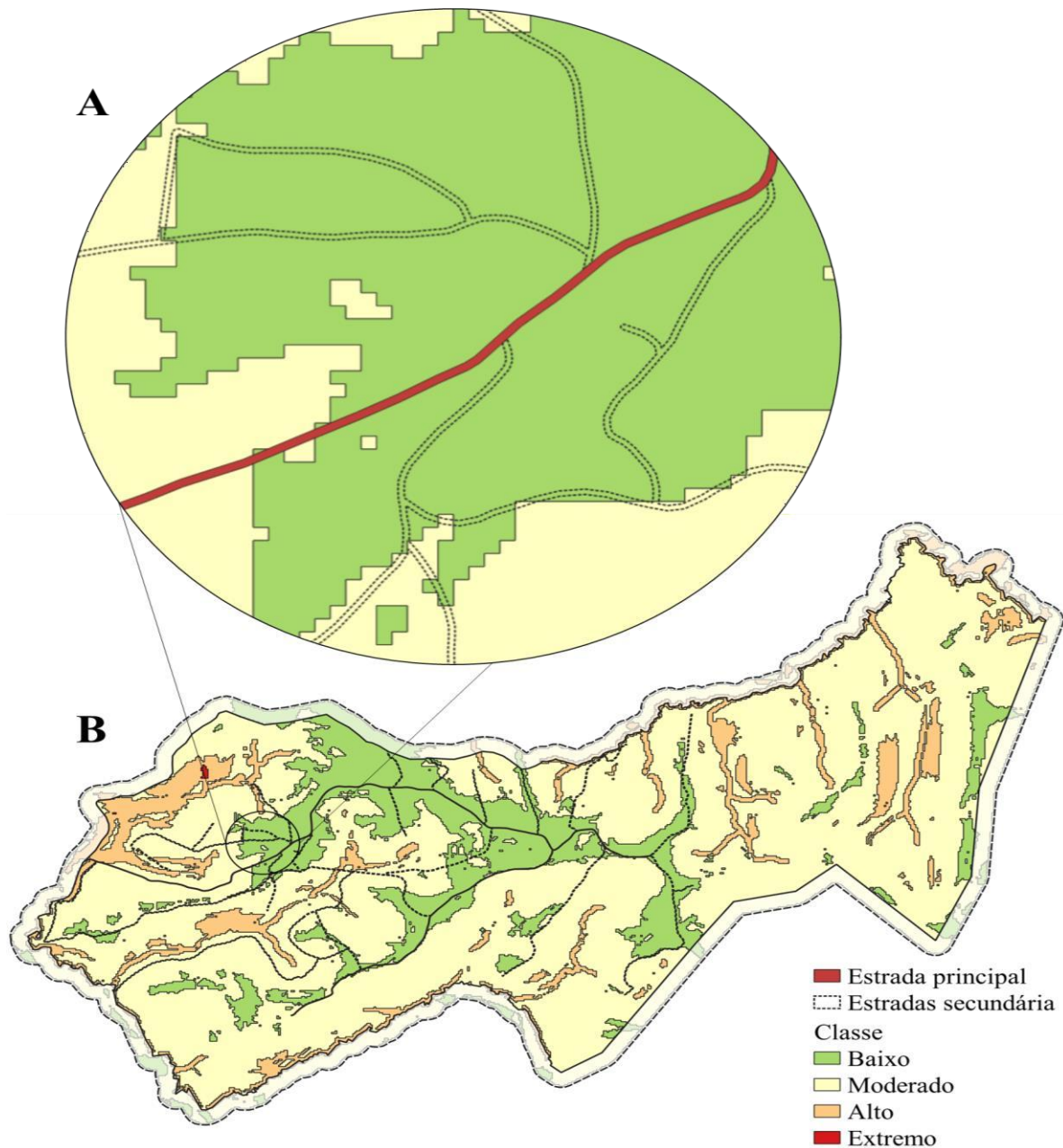


Figura 6. Quantificação das estradas florestais em relação ao nível de criticidade. A – Área aumentada, para facilitar a visualização das estradas. B – Distribuição espacial das estradas em relação aos distintos níveis de criticidade.

Ao integrar informações visuais e estratégias analíticas, essa abordagem não só facilita a tomada de decisões informadas, mas também contribui para a promoção de práticas de gestão florestal mais conscientes e adaptáveis.

5.5. Aplicação de modelo de otimização de rota

Na simulação para a alocação de estradas florestais, o mapa de criticidade desempenhou

um papel fundamental. O algoritmo utilizou esse mapa como base para determinar a melhor rota nos diferentes trechos (A-B, B-C, C-D, D-C). Ao empregar o complemento "Cost distance analysis", o algoritmo calculou o caminho de menor custo entre os pontos de origem e destino, considerando as variações de criticidade ao longo do terreno.

A rota simulada apresentada na Figura 7 não apenas reflete a distância física, mas também incorpora uma otimização estratégica baseada nos níveis de criticidade do mapa. Essa abordagem contribui para uma alocação eficiente de estradas florestais, adaptando-se dinamicamente às características específicas do terreno. A visualização da rota simulada destaca a aplicação do algoritmo no planejamento de rotas, evidenciando a influência significativa do mapa de criticidade nesse processo.

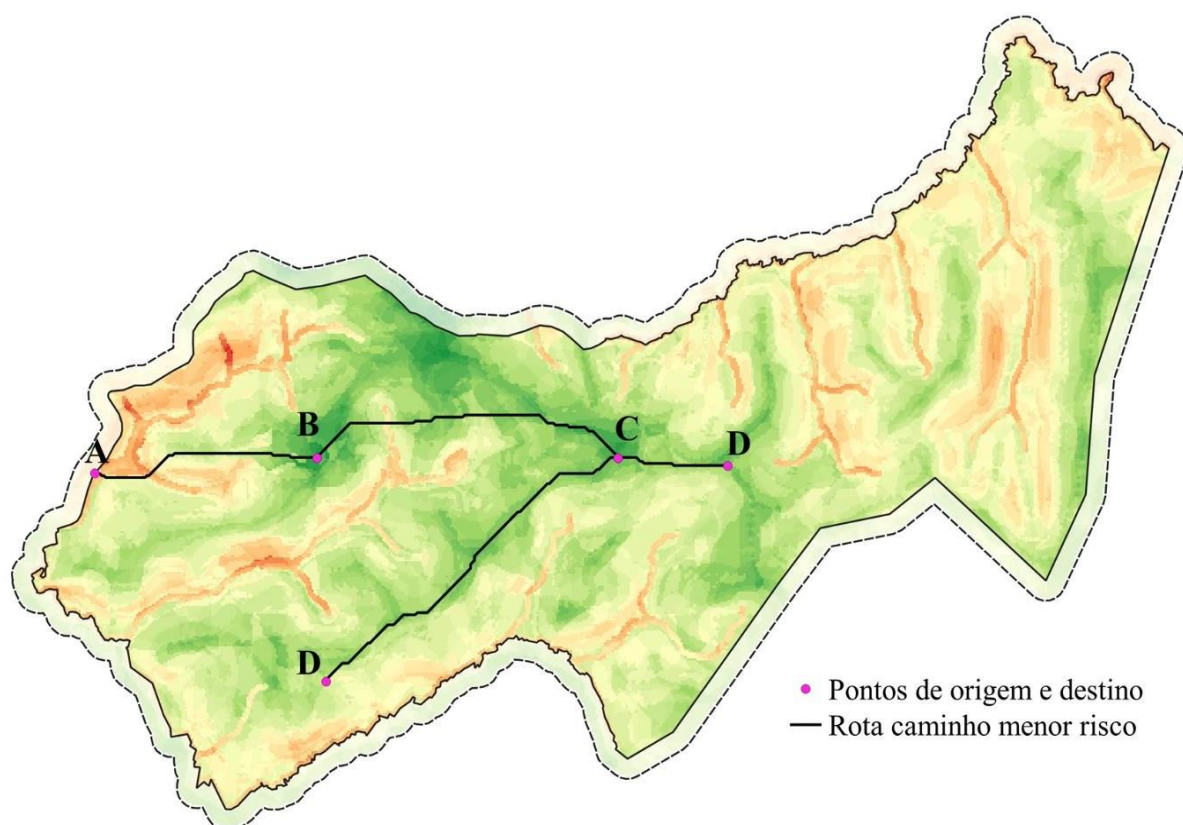


Figura 7. Rota simulada utilizando o complemento *Cost distance analysis* nos diferentes trechos (A-B, B-C, C-D, D-C) da estrada principal.

A Tabela 9 apresenta uma análise detalhada das distâncias comparativas, em metros, entre as rotas simuladas e reais das estradas florestais nos diferentes pontos. A discrepância

notável evidência que as distâncias simuladas consistentemente se mostram menores do que as distâncias reais em todos os trechos (A-B, B-C, C-D, D-C), indicando uma propensão do modelo para subestimar as distâncias em relação às condições reais. Além disso, ao examinar a variação nas discrepâncias entre os trechos, destaca-se uma diferença mais acentuada no trecho B-C, sugerindo uma possível sensibilidade do modelo nesse segmento específico.

A soma total das distâncias simuladas e reais revela uma discrepância cumulativa ao longo de toda a extensão das estradas analisadas. Ao considerar a distância total simulada de 5444,63 metros em comparação com a distância real total de 5900,60 metros, observa-se uma subestimação global por parte do modelo. Essa análise oferece uma visão crítica da performance do modelo, fornecendo informações fundamentais para ajustes e refinamentos futuros, aprimorando assim a precisão das simulações.

Tabela 9. Distâncias comparativas das estradas florestais simulada e real.

| Pontos | Distância (m) | |
|--------|---------------|---------|
| | Simulada | Real |
| A – B | 1193,42 | 1263,22 |
| B – C | 1707,83 | 1956,17 |
| C - D | 573,47 | 699,99 |
| D – C | 1969,91 | 1981,22 |
| Total | 5444,63 | 5900,60 |

Ao analisar a Tabela 10, torna-se claro que houve uma redução nas quantidades de estradas em algumas classes simuladas em comparação com as classes reais. Notavelmente, a classe Moderado revela uma diminuição de 10,52% na quantidade de estradas simuladas em relação às estradas reais, enquanto a classe Baixa apresenta um aumento de 9,71%. Essas variações sugerem que o modelo de simulação propõe uma distribuição estratégica menos intensa ou extensa de estradas na categoria Moderado, enquanto há um acréscimo na classe Baixa em comparação com a distribuição real. Essa variação pode ser interpretada como uma oportunidade de otimizar a infraestrutura de estradas em áreas de baixa criticidade, o que pode resultar em custos reduzidos de implementação e manutenção.

Tabela 10. Quantificação das estradas florestais simuladas e reais em relação ao nível de criticidade.

| Classes | Estrada principal simulada | | Estrada principal real | |
|---------|----------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| | Área em ha | Área em % | Área em ha | Área em % |

| | | | | |
|----------|------|--------|------|--------|
| Baixa | 2,43 | 74,39 | 2,30 | 64,68 |
| Moderado | 0,78 | 23,87 | 1,22 | 34,39 |
| Alto | 0,06 | 1,75 | 0,03 | 0,93 |
| Total | 3,26 | 100,00 | 3,55 | 100,00 |

Os resultados apresentados indicam a necessidade de aplicação de um modelo que possa oferecer suporte na realização de uma análise prévia detalhada para determinar a melhor posição de alocação de estradas florestais. Isso ressalta a importância de adotar uma abordagem mais estratégica na alocação de estradas, demonstrando a relevância de incorporar fatores como criticidade do terreno durante o planejamento, otimizando efetivamente os recursos, reduzindo custos e promovendo uma gestão florestal mais eficiente e sustentável.

5.6. Validação da alocação de estradas florestais

O processo de validação para a alocação de estradas florestais envolveu a utilização do mapa de uso e ocupação do solo, incorporando a estrada previamente definida, juntamente com os critérios estabelecidos no item 5.2. Essa abordagem resultou na criação de um novo mapa de zoneamento, conforme representado na Figura 8. A confiabilidade dos resultados foi avaliada ao predefinir uma estrada que conecta os trechos (A-B, B-C, C-D, D-C), no terreno, com o objetivo de verificar e validar a execução do algoritmo "Least Cost Path". Esse método permitiu a comparação direta entre a estrada previamente estabelecida e a rota determinada pelo algoritmo, contribuindo para a verificação da precisão e eficácia da alocação proposta.

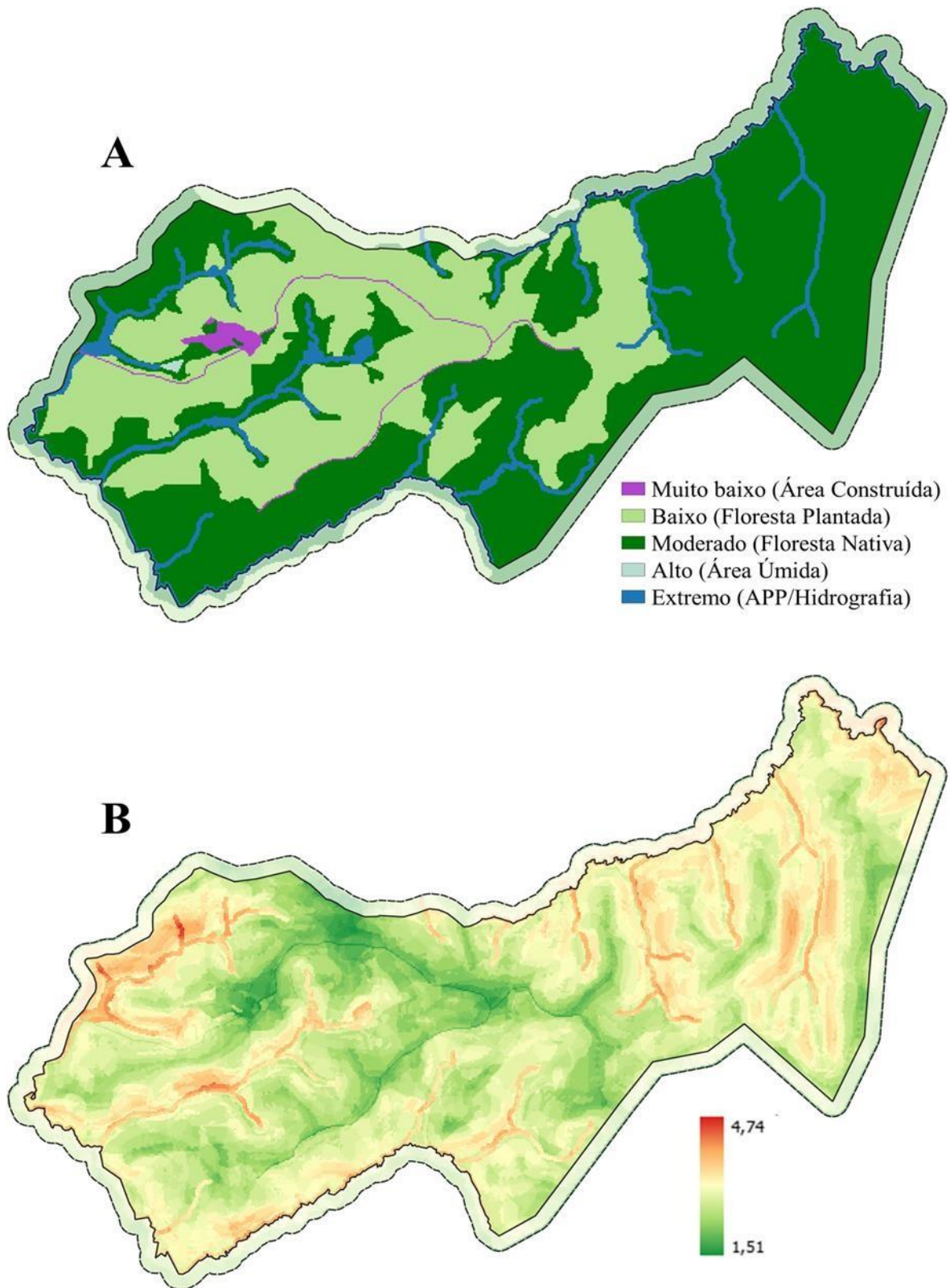


Figura 8. A – Uso e Ocupação do solo com a estrada previamente definida (estrada existente); B - novo mapa de zoneamento.

Na Tabela 11, podemos observar que as distâncias validadas são maiores do que as distâncias reais em todos os trechos (A-B, B-C, C-D, D-C). Essa discrepância nas distâncias entre as rotas validada e real sugere a possibilidade de influência da resolução do pixel na imagem utilizada durante o processo de simulação e validação. A resolução da imagem desempenha um papel crítico na precisão das medições, podendo introduzir distorções nas distâncias calculadas pelo algoritmo.

Em ambientes geoespaciais, ao realizar simulações e validações, é essencial considerar a resolução da imagem como um fator significativo. A qualidade e resolução da imagem podem impactar diretamente na acurácia das medições. Portanto, é essencial escolher imagens de alta resolução e aplicar métodos de processamento adequados para assegurar resultados mais precisos.

Tabela 11. Distâncias comparativas entre os pontos simulados, validados e reais das estradas florestais.

| Pontos | Distância (m) | | |
|--------|---------------|-----------|---------|
| | Simulada | Validação | Real |
| A – B | 1193,42 | 1355,383 | 1263,22 |
| B – C | 1707,83 | 2032,787 | 1956,17 |
| C - D | 573,47 | 732,235 | 699,99 |
| D – C | 1969,91 | 2071,069 | 1981,22 |
| Total | 5444,63 | 6191,474 | 5900,60 |

Na Figura 9 é possível observar uma análise visual das rotas simulada, real e validada para a alocação de estradas florestais. Na imagem A, é possível observar a rota gerada pelo modelo de simulação, baseada nos critérios e no mapa de criticidade. A imagem B representa a rota real, previamente definida no terreno. A comparação entre essas duas rotas destaca as discrepâncias e semelhanças entre o modelo simulado e as condições reais.

Notavelmente, ao examinar a imagem C, que mostra a rota validada, percebe-se que essa rota não apresenta diferenças em comparação com a rota real (B). Esse resultado sugere que o algoritmo "Least Cost Path" foi capaz de definir uma rota que se alinha precisamente com a condição real do terreno. A ausência de diferenças substanciais indica a eficácia do modelo na determinação da melhor rota de alocação de estradas florestais, reforçando sua utilidade para a gestão estratégica dessas infraestruturas.

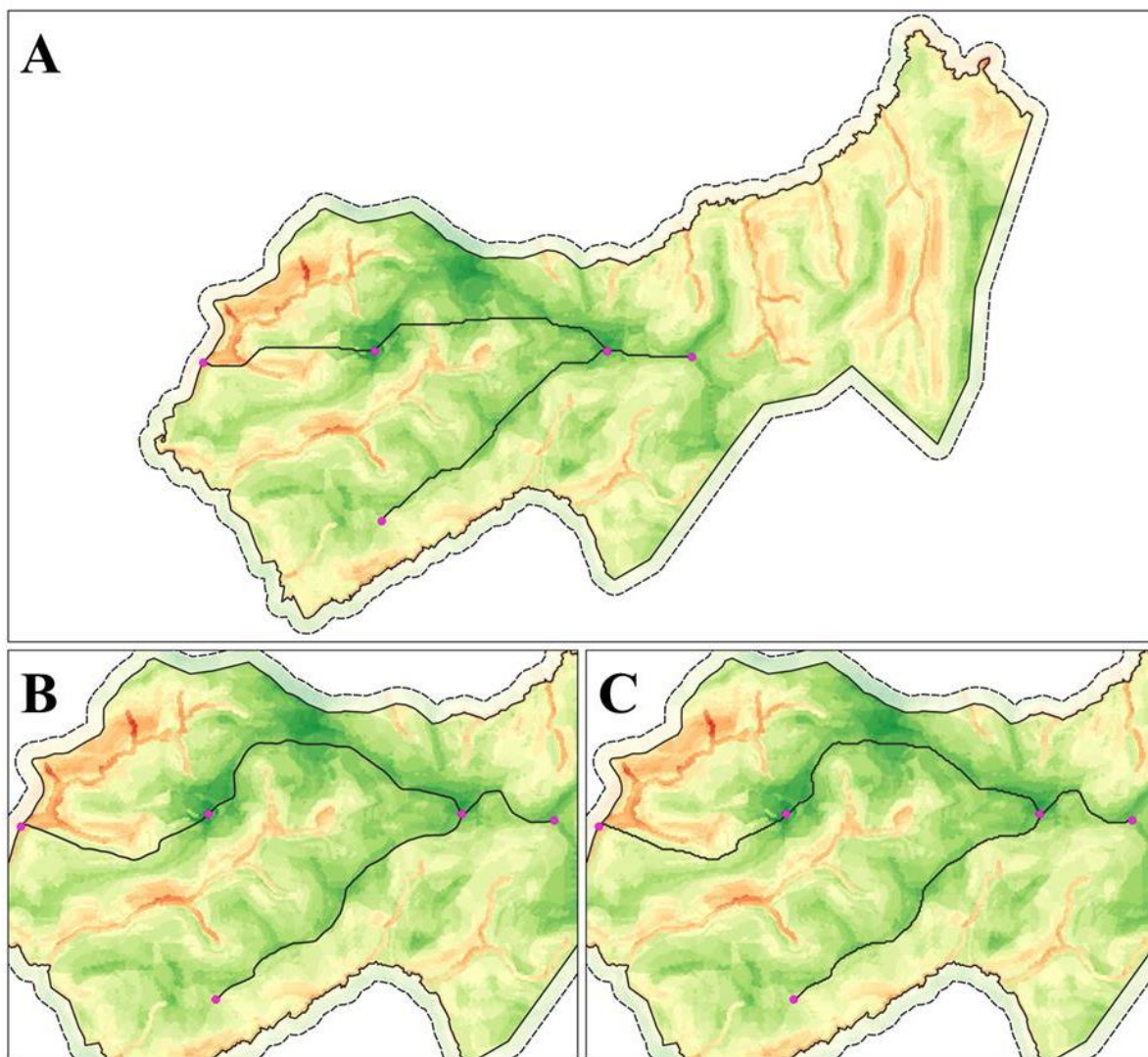


Figura 9. Validação da alocação de estradas florestais: A - rota simulada; B - rota real e C – rota validada.

Segundo Varela-García (2013), o algoritmo “Least Cost Path” tem uma grande vantagem para análise de acessibilidade, pois permite obter os custos de deslocamento entre os locais escolhidos e qualquer outro local da área de estudo, podendo definir as rotas ótimas a partir do menor custo.

6. CONCLUSÕES

A combinação da CLP com o AHP para criar um mapa de criticidade revelou-se uma ferramenta valiosa para o planejamento do sistema viário florestal. A abordagem integrada

desses métodos proporcionou uma base sólida para a tomada de decisões proativas. Essas informações são essenciais para orientar estratégias de gestão adaptadas às características específicas das estradas florestais na região de estudo, promovendo uma gestão eficiente e sustentável.

A análise detalhada da distribuição das estradas florestais em relação aos diferentes níveis de criticidade, utilizando ferramentas de geoprocessamento, forneceu uma visão clara e fundamentada do panorama de criticidade. Os resultados indicam a necessidade de uma abordagem estratégica na alocação de estradas, ressaltando a importância de incorporar fatores como criticidade do terreno durante o planejamento.

A aplicação do método de análise de caminhos de menor custo em ambiente SIG, utilizando o algoritmo "Least Cost Path", mostrou-se eficiente na criação de rotas para a alocação de estradas florestais. A rota simulada alinhou-se precisamente com a condição real do terreno, evidenciando a eficácia do modelo na determinação da melhor rota. A ausência de diferenças substanciais destaca a utilidade prática desse modelo na gestão estratégica das infraestruturas florestais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI, E.; MAJNOUNIAN, B.; DARVISHSEFAT, A. et al. A GIS-MCE based model for forest road planning. **Forest science magazine**, v. 55, n. 4, pág. 171-176, 2009. DOI:org/10.17221/52/2008-JFS

ALVARES C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p.711-728, 2013.

ARANTES, A. E.; SOUSA, S.B.; SOARES, G. S. C. et al. Análise da temperatura da superfície terrestre e índice de vegetação SAVI para o município de Goiânia, 2009. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013, INPE

BANHARA, J. R.; RODRIGUEZ, L.C.E.; SEIXAS, F. et al. Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e climáticas. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 85, p. 85-95, 2010.

BISPO, P. C.; VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M. Relação entre as variáveis morfométricas extraídas de dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e a vegetação do Parque Nacional de Brasília. **Acta botânica brasileira**, n. 24, v.1, p. 96-103, 2010.

BOROUGHAKI, S.; MALCZEWSKI, J. Implementando uma extensão do processo de hierarquia analítica usando operadores de média ponderada ordenada com quantificadores difusos no ArcGIS. **Computadores & geociências**, v. 34, n. 4, pág. 399-410, 2008.

BUGDAY, E. Application of an artificial neural network system based on ANFIS using GIS to predict suitability mapping of forest road networks. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 27 n. 3, pág. 1656-1668, 2018.

ÇALIŞKAN, E. Planning of Forest Road Network and Analysis in Mountainous Area. **Life Science Journal**, v. 10 n. 2, p. 2456-2465, 2013.

ÇALIŞKAN, E.; BEDIROGLU, S.; YILDIRIM, V. Determination forest road routes via gis-based spatial multi-criterion decision methods. *Applied ecology and environmental research*, v. 17, n. 1, p. 759-779, 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1701_759779

CAPOANE, V.; SILVA, D. A da. Avaliação de parâmetros geomorfométricos derivados de modelos altimétricos de diferentes fontes e resoluções: estudo de caso da bacia hidrográfica do córrego Lajedo, Campo Grande, MS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 674-690, 2020. DOI:org/10.26848/rbgf.v13.2.p674-690

CARVALHO, F. M. C. de. **Efetividade de projetos de desenvolvimento local na perspectiva da avaliação de impacto social: estudos de caso no litoral do Piauí**. 2022. Tese (Doutorado em Administração) – Centro Universitário FEI, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.fei.edu.br/handle/FEI/4700>

CORRÊA, C. M.C.; MALINIVSKI, J. R.; ROLOFF, G. Bases para Planejamento de Rede Viária em Reflorestamento no Sul do Brasil. **Revista Floresta**, v. 36, n. 2, p. 277. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v36i2.6450>

DIETRICH, L. S.; TIGGES, C. H. P.; CORDEIRO, V. A. et al. Uso de dados lidar para identificação de locais susceptíveis a erosão em estradas florestais. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Santos Anais [...]**, INPE, 2019, p. 1330-1333.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. ver. Rio de Janeiro: Ed. Embrapa Solos, 2011.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro: Ed. Embrapa Solos, 1979.

EMMERT, F.; PEREIRA, R. S.; REZENDE, A.V. et al. Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gerência de pavimentos em estradas florestais. *Ciência Florestal*, v. 20, n. 1, p. 81-94, 2010.

FEARNSIDE, P. M. A tomada de decisão sobre grandes estradas amazônicas. In: FEARNSIDE, P. M. (org.). **Destruição e conservação da floresta amazônica**. Manaus: Editora INPA, 2022. P. 317-327.

FERRAZ, S. F. B; MARSON, J. C.; FONTANA, C. R et al. Uso de indicadores hidrológicos

para classificação de trechos de estradas florestais quanto ao escoamento superficial. **Scientia Forestalis.**, n. 75, p. 39-49, 2007.

FU, B; NEWHAM, L TH; RAMOS-SCHARRÓN, C. E. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, p. 1-14, 2010.

GOMES, V. S. **Planejamento operacional da colheita sob condições de incerteza na manutenção de estradas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

HAYATI, E.; MAJNOUNIAN, B.; ABDI, E. et al. An expert-based approach to forest road network planning by combining Delphi and spatial multi-criteria evaluation. **Environmental monitoring and assessment**, v. 185, p. 1767–1776. 2013. [DOI:org/10.1007/s10661-012-2666-1](https://doi.org/10.1007/s10661-012-2666-1)

HO, W. Integrated analytic hierarchy process and its applications – A literature review. **European Journal of Operational Research**, v. 186, n. 1, p. 211-228, 2008. DOI:org/10.1016/j.ejor.2007.01.004

HOSSEINI, S. A.O.; MOGHADASI, P.; FALLAH, A. Forest road network design based on multipurpose forestry management in hyrcanian forest. *Journal of Environmental Science and Management*, v. 22, n. 2, 2019. DOI:org/10.47125/jesam/2019_2/03

IBGE. Manual técnico da Vegetação Brasileira (Manuais Técnicos de Geociências- número 1). 2 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.

JAAFARI, A.; NAJAFI, A.; REZAEIAN, J. et al. Modeling erosion and sediment delivery from unpaved roads in the north mountainous forest of Iran. **GEM - International Journal on Geomathematics**, v. 2, p. 343-356, 2015. DOI:org/10.1007/s13137-014-0062-4

JÚNIOR, J. F. P.; RODRIGUES, S. C. O 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, p. 4-26, 2012.

KANTARTZIS, A. Implementation of multi-criteria evaluation for mapping the spatial variability of optimal forest road network. **International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics**, v. 9, n. 3, p. 275-293, 2023. DOI:org/10.1504/IJSAMI.2023.131908

KAZAMA, V.S; CORTE, A. P. D.; ROBERT, R. C. G. et al. (). Revisão global sobre planejamento de otimização de estradas florestais: Apoio ao manejo florestal sustentável na Amazônia. **Ecologia e Manejo Florestal**, v. 492, p. 119-159, 2021.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **International Biometric Society**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977. [DOI:org/10.2307/2529310](https://doi.org/10.2307/2529310)

LOPES, E. S.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P. Classificação e custos de estradas em

florestas plantadas na região sudeste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 26, n. 3, p. 329-338, 2002. DOI:org/10.1590/S0100-67622002000300008

MALCZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**, v. 62 n. 1, p. 3-65, 2004. DOI:org/10.1016/j.progress.2003.09.002

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 7, p. 703-26, 2006. DOI:org/10.1080/13658810600661508

MARCATTI, G. E. **Otimização do Traçado Geométrico de Estradas Florestais**. Tese (Doutorado Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2017.

MARCELINO, F. A.; FENNER, P. T.; SCHACK-KIRCHNER, H. et al. Relação entre risco de erosão e distância de camalhões em estradas florestais. **Revista Energia na Agricultura**, v. 27, n.3, p.61-73, 2012.

MARINS, C. S.; SOUZA, D. O.; BARROS, M. S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais—um estudo de caso. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41., 2009. Porto Seguro. **Anais [...]**. Porto Seguro: UFJF, 2009. p. 1778 – 1788.

MENESES, P. R; ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. UnB-CNPq. Brasília, 2012.

MORAES, A. C de. **Classificação de estradas florestais e determinação de rotas de transporte utilizando Sistema de Informação Geográfica**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2014.

MOURA, L. A. A. **Economia Ambiental: Gestão de Custos e Investimentos**. 5 ed. São Paulo, SP: Freitas Bastos Editora, 2023.

O'CALLAGHAN, J.F.; MARK, D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**. v. 28, p. 323-344, 1984.

OLIVEIRA, R. J.; MACHADO, C. C.; CORDEIRO, S. A. et al. Análise de processo hierárquico para gerir as estradas florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 20, p. 38-44, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/loram.2012.073>

PIMENTA, L. B.; BELTRÃO, N. E. S.; GEMAQUE, A. M. D. S.; et al. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações**, v. 20, n. 2, p. 407-420, 2019.

PARSAKHOO, A. Technical assessment of forest road network using Backmund and surface distribution algorithm in a hardwood forest of Hyrcanian zone. **Forest Systems**, v.25, n.2, p. 1-9, 2016.

RIBEIRO, M. C. C. R.; ALVES, A. S. Aplicação do método Analytic Hierarchy Process (AHP) com a mensuração absoluta num problema de seleção qualitativa. **Revista Eletrônica Sistemas**

& Gestão, v. 11, n. 3, p. 270-281, 2016.

RODE, R. **Planejamento da produção florestal em propriedades rurais**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2014.

ROSA, R. Análise espacial em geografia. **Revista da ANPEGE**, v. 7, n. 1, p. 275-289, 2011.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 81-90, 2005. DOI:org/10.7154/RDG.2005.0016.0009

ROSA, R. O uso de tecnologias de informação geográfica no brasil. **Revista Geográfica de América Central**, v. 2, p. 1-17, 2011.

SAATY, T. L. Priority Setting in Complex Problems. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 30, n. 3, p. 140–155, 1983. DOI:10.1109/tem.1983.6448606

SAATY, T.L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v.48, p.9-26, 1990. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)

SAATY. T. H. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v.15, n. 3, p. 234-281, 1977. DOI:org/10.1016/0022-2496(77)90033-5

SAMANI, KM; HOSSEINY, SA; LOTFALIANO, M. et al. Planning road network in mountain forests using GIS and Analytic Hierarchical Process (AHP). **Caspian Journal of Environmental Sciences**. V. 8, n. 2 p. 151–162, 2010.

SILVA, M.L.; OLIVEIRA, R.J.; VALVERDE, S.R. et al. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **Revista Árvore**, v. 31, n. 6, p. 1073-1080, 2007. DOI:org/10.1590/S0100-67622007000600012

SOUZA, A. D.; SOBRAL, M. C.; CANDEIAS, A. B. Geotecnologias aplicadas às auditorias de obras públicas no Brasil: panorama geral e perspectivas. **Revista da Sociedade Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 8, 2017.

SREENIVASAN, G., JHA, C.S. **Tecnologia Geoespacial para Mapeamento Geomorfológico e Suas Aplicações**. In: Tecnologias geoespaciais para planejamento e gerenciamento de recursos. Biblioteca de Ciência e Tecnologia da Água, vol 115, p. 1-47, 2022.

TAMPEKIS, S.; SAKELLARIOU S.; SAMARA F. et al. Mapping the optimal forest road network based on the multicriteria evaluation technique: the case study of Mediterranean Island of Thassos in Greece. **Environ Monit Assess**, v. 187, n. 687 p. 1-17, 2015. DOI:10.1007/s10661-015-4876-9

VALENTE, R. A.; PETEAN, F. C. S.; VETTORAZZI, C. A. Análise de decisão multicritério para priorização de áreas para restauração florestal. **Cerne**, v. 23, pág. 53-60, 2017.

VALENTE, R.A.; VETTORAZZI, C.A. Avaliação multicriterial na definição de áreas prioritárias à restauração florestal, visando ao manejo sustentável da água. In: Sustentabilidade

do uso da água nos trópicos e subtropicais: estudos de caso. Unijui, Ijuí. 2013.

VARELA-GARCÍA, F.A. Análisis Geoespacial para la Caracterización Funcional de las Infraestructuras Viarias en Modelos de Accesibilidad Territorial Utilizando Sistemas de Información Geográfica. Tese (Doutorado). Universidade da Coruña, A Coruña, Espanha, 2013.

VETTORAZZI, C. A.; VALENTE, R. A. Priority areas for forest restoration aiming at the conservation of water resources. **Ecological Engineering**, v. 94, p. 255-267, 2016.

VILELA, M. H.S. B. **Integração dos métodos: multicritério para tomada de decisão e sistema de informação geográfica para seleção de locais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

VILHENA, G.; SILVA, O. Avaliação de impactos ambientais de rodovias no Módulo II da Floresta Estadual do Amapá. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, v. 1, n. 12, p. 357-381, 2017. Disponível em: [http:// dx.doi.org/10.17127/got/2017.12.016](http://dx.doi.org/10.17127/got/2017.12.016)

ZAGONEL, R.; CORRÊA, C. M. C.; MALINOVSKI, J. R. Análise da densidade ótima de estradas de uso florestal em relevo plano de áreas com produção de *pinus taeda*. **Scientia forestalis**, v. 36, n. 77, p. 33-41, 2008.