

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE**  
**CAMPUS DE SOROCABA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE**  
**RECURSOS RENOVÁVEIS**

**CARLA AMÉRICO**

**CRITÉRIOS AMBIENTAIS EM UM MODELO DE SUPORTE À DECISÃO NO**  
**PLANEJAMENTO DE ESTRADAS FLORESTAIS.**

**SOROCABA, 2023**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE**  
**CAMPUS DE SOROCABA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE**  
**RECURSOS RENOVÁVEIS**

**CARLA AMÉRICO**

**CRITÉRIOS AMBIENTAIS EM UM MODELO DE SUPORTE À DECISÃO NO**  
**PLANEJAMENTO DE ESTRADAS FLORESTAIS.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis da Universidade do Federal de São Carlos- *campus* Sorocaba, como pré-requisito à obtenção de título de doutora, na linha de pesquisa de manejo de recursos renováveis.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Roberta Avena Valente

SOROCABA, 2023

Américo, Carla

Critérios ambientais em um modelo de suporte à decisão no planejamento de estradas florestais / Carla Américo -- 2023.  
144f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Roberta Aversa Valente Botezelli Tolini  
Banca Examinadora: Arthur Araújo Silva, Ivan Vanderley Silva, Mariana Peres de Lima Chaves e Carvalho, Tatiana Sussel Gonçalves Mendes

Bibliografia

1. Planejamento florestal. 2. Avaliação multicriterial. 3. Análise de sensibilidade.. I. Américo, Carla. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade  
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

---

## Folha de Aprovação

---

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Carla Américo, realizada em 16/02/2023.

### Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Roberta Avena Valente Botezelli Tolini (UFSCar)

Profa. Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes (UNESP)

Prof. Dr. Arthur Araújo Silva (UFV)

Prof. Dr. Ivan Vanderley Silva (Prefeitura de Barueri)

Profa. Dra. Mariana Peres de Lima Chaves e Carvalho (UFMT)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

*Agradeço a Deus pelo suporte e dedico ao meus pais, Reinaldo e Lucilena, que sempre me deram amor e apoio incondicional, sobretudo nos estudos.*

## RESUMO

AMÉRICO, Carla. Critérios ambientais em um modelo de suporte à decisão no planejamento de estradas florestais. 2023. Tese (Doutorado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2023.

As estradas florestais, quando não são bem estruturadas e alocadas, tornam-se fontes potenciais de impactos ambientais, principalmente os relacionados à dinâmica de água e produção de sedimentos. Neste contexto, o objetivo geral foi apresentar uma abordagem para o planejamento de estradas florestais, focada na conservação hidrológica, topográfica e na estabilidade dos solos, com o uso da avaliação multicriterial (AMC). Para isso, a tese foi estruturada em capítulos, em que o primeiro traz uma revisão sobre estradas florestais e metodologias utilizadas atualmente para seu planejamento e otimização. No segundo capítulo, considerando que o mapa de solo é essencial para análise ambiental, e que é comumente representado em classes, elaborou-se um mapa contínuo do solo por meio da lógica difusa e geoestatística, avaliando o mapa de saída do modelo da AMC a partir de uma análise de sensibilidade. No terceiro capítulo, a partir da AMC integrou-se os critérios declividade, erodibilidade, distância à rede hidrográfica e índice topográfico de umidade, para se obter a fragilidade ambiental em duas fazendas de produção florestal. No quarto capítulo, avaliou-se a importância dos critérios, previamente selecionados, os quais suportaram áreas prioritárias para alocação de estradas florestais, por meio do método da Combinação Linear Ponderada (CLP) da AMC. No quinto capítulo, avaliou-se o desempenho do método da média ponderada ordenada (MPO) em relação ao método CLP, na priorização de áreas para alocação de estradas florestais, considerando os critérios previamente selecionados. Como conclusão geral, suportada pelos resultados dos capítulos, obteve-se que é possível utilizar o método da CLP no planejamento de estradas florestais, o qual obteve bom desempenho comprovado pela análise de sensibilidade. Sendo assim, o modelo de decisão proposto, leva à otimização de recursos e ações, que garantirá aos empreendimentos florestais trafegabilidade e acesso aos talhões durante todo o ano, assim como a conservação da água e do solo da paisagem.

Palavras-chave: krigagem; lógica difusa; fragilidade ambiental; avaliação multicriterial; análise de sensibilidade; planejamento florestal.

## ABSTRACT

AMÉRICO, Carla. Environmental criteria in a decision support model for the planning of forest roads. 2023. Thesis (Ph.D. in Planning and Use of Renewable Resources) – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2023

When not well structured and allocated, forest roads become potential sources of environmental impacts, especially those related to water dynamics and sediment production. In this context, the general objective was to present an approach for planning forest roads focused on hydrological conservation, topography, and soil stability, with the use of multicriteria evaluation (MCE). For this, the thesis was structured in chapters, in which the first one brings a review about forest roads and methodologies currently used for their planning and optimization. In the second chapter, considering that the soil map is essential for environmental analysis, and that it is commonly represented in classes, a continuous soil map was elaborated by means of fuzzy logic and geostatistics, evaluating the output map of the MCE model from a sensitivity analysis. In the third chapter, from MCE we integrated the criteria slope, erodibility, distance to the hydrographic network and topographic wetness index, to obtain the environmental fragility in two forest production farms. In the fourth chapter, the importance of the previously selected criteria that supported priority areas for forest road allocation was evaluated using the Weighted Linear Combination (WLC) method. In the fifth chapter, the performance of the Ordered Weighted Average (OWA) method was evaluated in relation to the WLC method, in the prioritization of areas for forest road allocation, considering the previously selected criteria. As a general conclusion, supported by the results of the chapters, it was obtained that it is possible to use the WLC method in the planning of forest roads, which obtained good performance proven by the sensitivity analysis. Thus, the proposed decision model leads to the optimization of resources and actions, which will ensure that forest enterprises will have access to the stands throughout the year, as well as the conservation of water and soil in the landscape.

Keywords: kriging; fuzzy logic; environmental fragility; multicriteria analysis; sensitivity analysis, forest planning.

**LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS**

ACP	Análise de componentes principais
AHP	Processo hierárquico analítico
AMC	Avaliação multicriterial
APP	Áreas de preservação permanente
AS	Análise de sensibilidade
AUC	Area under curve - (Área sob a curva)
CLP	Combinação Linear Ponderada
CPs	Componentes principais
DRH	Distância da rede hidrográfica
GNSS	Global Navigation Satellite System - (Sistema Global de Navegação por Satélite)
IC	Intervalo de confiança
ITU	Índice topográfico de umidade
K	Erodibilidade do solo
MDE	Modelo digital de elevação
MFS	Manejo florestal sustentável
MPO	Média ponderada ordenada
Pf	Peso de fator
Po	Peso de ordenação
RL	Reserva legal
ROC	Receiver operating characteristic- (Característica de Operação do Receptor)
SE	Serviços ecossistêmicos
SIG	Sistema de informação geográfica
TC	Taxa de consistência
USLE	Universal Soil Loss Equation – (Equação universal de perdas de solo)

## **Sumário**

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS .....	iii
Introdução .....	1
CAPÍTULO 1: Revisão bibliográfica .....	3
Referências .....	11
CAPÍTULO 2: Análise de sensibilidade para avaliação do critério solo no planejamento de estradas florestais .....	27
Resumo .....	27
Abstract.....	27
1. Introdução.....	28
2. Material e métodos .....	31
2.1. Área de estudo .....	31
2.2. Modelo conceitual de apoio à tomada de decisão.....	32
2.3. Mapeamento de solos.....	32
2.3.1. Fator K suportado pelo método booleano .....	33
2.3.2. Fator K suportado pelo método geoestatístico .....	33
2.4. Áreas críticas para alocação de estradas florestais .....	34
2.5. Importância dos critérios.....	35
2.6. Influência dos critérios.....	36
2.7. Agregação dos critérios .....	36
2.8. Análise de sensibilidade.....	37
3. Resultados.....	38
4. Discussão .....	43
5. Conclusão .....	47
Referências .....	47
CAPÍTULO 3: Fragilidade ambiental em plantios florestais comerciais visando o manejo sustentável.....	57
Resumo .....	57
Abstract.....	57
1. Introdução.....	58
2. Material e métodos .....	61
2.1. Área de estudo .....	61
2.2. Critérios ambientais .....	63
2.3. Fragilidade ambiental .....	63

2.4. Análise de componentes principais.....	64
3. Resultados.....	65
4. Discussão.....	69
5. Conclusão.....	73
Referências.....	73
CAPÍTULO 4: Elaboração de um modelo de apoio à decisão para priorização de áreas à alocação de estradas florestais.....	82
Resumo.....	82
Abstract.....	82
1. Introdução.....	83
2. Material e métodos.....	85
2.1. Área de estudo.....	85
2.2. Critérios ambientais.....	87
2.3. Normalização dos critérios.....	88
2.4. Áreas prioritárias à alocação de estradas florestais.....	88
2.5. Validação do modelo de priorização de áreas.....	89
3. Resultados.....	90
4. Discussão.....	96
5. Conclusão.....	99
Referências.....	99
CAPÍTULO 5: Comparação entre métodos de avaliação multicritério para priorização de áreas à alocação de estradas florestais.....	108
Resumo.....	108
Abstract.....	109
1. Introdução.....	110
2. Material e métodos.....	112
2.1. Modelo conceitual de apoio à tomada de decisão.....	112
2.2. Método da Média Ponderada Ordenada - MPO.....	112
2.3. Influência dos critérios.....	115
2.4. Comparação dos modelos decisórios.....	115
3. Resultados.....	116
4. Discussão.....	123
5. Conclusão.....	126
Referências.....	127
CAPÍTULO 6: Considerações finais.....	134

## **Introdução**

No setor florestal, a rede viária é responsável por fornecer acesso à diferentes partes de uma floresta para atividades de manutenção, como proteção contra incêndio, controle de pragas, plantio e operações de exploração madeireira.

As estradas não pavimentadas, normalmente possuem como pista de rolamento o solo do próprio local, podendo ter eventualmente recebido algum tipo revestimento primário, cuja qualidade desta estrada depende do tipo de solo, fatores climáticos e manutenções preventivas e/ou corretivas realizadas.

Atualmente, as estradas de uso florestal são um crescente motivo preocupação nas áreas de planejamento das empresas, não somente em relação ao seu custo de manutenção, sobretudo nos custos que incidem sobre o transporte da madeira e o produto final.

A abertura de estradas pode causar danos na estrutura dos solos e no comportamento hidrológico local, o que tornam essas vias vulneráveis a impactos ecológicos e sociais negativos. As estradas em condições inadequadas, combinada com a periodicidade de uso e tráfego de máquinas pesadas, seja durante as atividades de plantio, de colheita ou transporte florestal, podem potencializar os impactos ecológicos, como os processos erosivos. Portanto, é importante que as estradas sejam devidamente planejadas e mantidas no que diz respeito a sua manutenção, a fim de permitir a disponibilidade para tráfego durante o ano, sobretudo em períodos chuvosos.

Neste contexto, para avaliar os problemas relacionados à alocação inadequada da rede viária necessita-se considerar conjuntamente aspectos físicos da paisagem, como solo, água e relevo, como também os relacionados às próprias condições das estradas, incluindo a necessidade de manutenções de alguns de seus trechos. Desta forma é possível evitar impactos ambientais, tais como erosões e acúmulos de água e, assim, promover tanto a conservação do solo quanto da água na paisagem.

No caso das estradas florestais vários critérios ambientais precisam ser avaliados para auxiliar no planejamento de rotas alternativas e de localização de trechos que necessitem de manutenções mais frequentes. Uma forma de combinar estes critérios é por meio de modelos de tomada de decisão, como a Avaliação Multicriterial (AMC), aplicadas em ambientes de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo baseado na AMC para alocação de estradas florestais em áreas prioritárias, ou seja, distantes dos cursos d'água, com solos estáveis e em menores declividades.

Para isso, a tese foi estruturada em capítulos, com o primeiro constituindo-se em uma revisão bibliográfica sobre estradas florestais e metodologias utilizadas para o seu planejamento e otimização. No segundo capítulo avaliou-se o potencial da lógica difusa, com a aplicação de métodos geoestatísticos, para a elaboração de mapas de solo, considerado um dos mapas básicos de entrada no processo decisório da AMC, para o planejamento de estradas florestais. Neste segundo capítulo, comparou-se resultados utilizando o mapa de solos em classes com um mapa de solos elaborado a partir de técnicas de geoestatística. Com uma análise de sensibilidade, foi possível avaliar como diferentes entradas (mapas de critérios) podem alterar a saída do modelo (mapas finais de criticidade).

No terceiro capítulo, avaliou-se a fragilidade ambiental da paisagem de estudo, a partir de critérios ambientais importantes para o planejamento de estradas florestais. O estudo do comportamento dos critérios nas áreas de estudo suporta ações de gestão para futuros planejamentos viários, visando principalmente à conservação da água e do solo.

No quarto capítulo, visto a importância do uso da geoestatística na elaboração dos mapas de solos (segundo capítulo), a definição de quais critérios são importantes (terceiro capítulo) para a tomada de decisão, realizou-se a identificação de áreas prioritárias para alocação de estradas florestais, para apoiar o manejo florestal sustentável e a provisão dos serviços ecossistêmicos.

No quinto capítulo, avaliou-se o método da Média Ponderada Ordenada (MPO), para priorização de áreas à alocação de estradas florestais, tendo como base os resultados dos capítulos anteriores, sobretudo o capítulo 4, no qual produziu-se a priorização de áreas por meio do método da Combinação Linear Ponderada (CLP). Dessa forma, foi possível comparar com os resultados obtidos por esses dois métodos de AMC para priorização de áreas à alocação de estradas florestais.

## **CAPÍTULO 1: Revisão bibliográfica**

As estradas florestais fornecem o principal acesso às florestas (Leung et al., 2015), sendo destinadas a conectar todos os pátios de armazenamento de madeira, proporcionando um transporte mais eficiente (Aguiar et al., 2020). São consideradas um componente essencial da silvicultura e do manejo florestal (Lotfalian et al., 2019), portanto, são consideradas infraestrutura básica para o manejo e operações florestais (Sakai, 1987; Baskent e Keles, 2005; Krč e Begues, 2013; Yoshida et al., 2018).

As redes de estradas florestais ainda permitem o acesso a áreas remotas (Enache et al., 2013) e é uma infraestrutura fundamental na redução de incêndios florestais (Hayati et al., 2012a; Laschi et al., 2016), desastres climáticos, e permitem o monitoramento de rotina e o tratamento rápido contra distúrbios naturais (Yoshida et al., 2018). Vários autores destacaram os efeitos importantes das estradas florestais em ambientes propensos a incêndios (Hinterstoisser, 1990; Fabiano e Marchi, 1991; Marinelli, 1994; Baldini e Pollini, 1998; Pičman e Pentek, 1998; Calvani et al., 1999; Laschi et al., 2019). E nas últimas décadas, a relação entre a malha viária florestal e a prevenção e supressão de incêndios florestais tem recebido cada vez mais atenção (Laschi et al., 2019).

Os estudos na área de planejamento e manutenção de estradas florestais têm se tornado mais importantes para o manejo florestal sustentável, devido às mudanças climáticas em todo o mundo, acelerando perturbações naturais com padrões climáticos extremos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014) e confere ao manejo florestal sustentável papel de sua mitigação (Álvarez-Miranda et al., 2018; Yoshida et al., 2018). Além disso, em cenários de mudanças climáticas, um aumento no número de anos com alto risco de incêndio; aumento na duração da temporada de incêndios e um aumento de eventos extremos que podem resultar em incêndios maiores, mais intensos e mais frequentes, são esperados (Moriondo et al., 2006; Giannakopoulos et al., 2009; Laschi et al., 2019).

As mudanças climáticas já aumentaram a ocorrência de grandes incêndios responsáveis pela maior parte da área queimada natural de floresta, vítimas humanas e graves danos às propriedades (Torre, 2009; Rodriguez-Silva, 2011; Laschi et al., 2019) e em muitos países, enfrentam-se incêndios florestais em condições que antes não eram conhecidas (Viegas, 2009; Laschi et al., 2019). Para considerar suficientemente os impactos das mudanças climáticas e para reduzir os custos associados, é importante que todos os aspectos relacionados ao manejo florestal sustentável sejam refletidos, e isso também deve ser considerado para a infraestrutura viária florestal (Yoshida et al., 2018). É de caráter imediato revisar as metodologias e técnicas

de construção e manutenção de estradas florestais, e observações contínuas são indispensáveis, assim como estudos prévios esclareceram vários fatores vitais no planejamento de estradas florestais (Yoshida et al., 2018).

No passado, as estradas florestais eram construídas principalmente para auxiliar na extração e no transporte de produtos madeireiros e não-madeireiros (Picchio et al., 2018). No entanto, nas últimas décadas, a crescente importância da multifuncionalidade florestal levou a uma abordagem diferente para o manejo de estradas, adicionando outras funções e finalidades àquelas relacionadas exclusivamente à colheita de madeira (Picchio et al., 2018), como, por exemplo, a provisão de serviços ecossistêmicos. Além disso, as estradas florestais também devem ser consideradas ecossistemas com um papel ativo no ambiente florestal, o que não é necessariamente negativo (Lugo e Gucinski, 2000; Laschi et al., 2016).

Como geralmente os plantios comerciais e a rede viária são entremeados com manchas de florestas nativas, que abrigam parte significativa da biodiversidade biológica, tem-se a preocupação com a provisão dos serviços ecossistêmicos, pois de acordo com diversos autores (Gios e Clauser, 2009; Gaodi et al., 2010; Hayati et al., 2012a), as florestas suportam muito destes serviços, incluindo produtos primários, produtos secundários, abastecimento de água, regulação hidrológica, purificação ambiental, formação do solo, conservação do solo, conservação da biodiversidade, recreação etc.

Como o uso múltiplo das florestas tem crescido recentemente em todos os serviços providos pelas florestas, não focando apenas na produção de madeira, se tem a necessidade de pensar no planejamento de estradas em meio a esse novo cenário, que visa o manejo sustentável dos recursos florestais. Por essas razões, um plano de rede de estradas bem estruturado deve apoiar o plano de manejo florestal, permitindo a melhor manutenção e valorização da rede viária, com foco nas reais necessidades de gestão, por meio de uma troca integrada de informações (Laschi et al., 2016).

Embora as estradas sejam o primeiro passo no desenvolvimento dos recursos florestais (Potocnik, 1996; Bjorklund, 2005; Turk, 2019), elas também são conhecidas por causar erosão e sedimentação (Demir et al., 2012; Makineci et al., 2015; Erdem et al., 2018; Akay et al., 2018a; Turk, 2019). Estradas florestais ainda podem causar produção de sedimentos e poluição da água fora do seu local (Arnaez et al., 2004; Forsyth et al., 2006; Ramos-Scharro'n e MacDonald 2007; Jordán-López et al., 2009; Fu et al., 2010; Hayati et al., 2012b) e também fragmentação ecológica e perturbação em paisagens florestais (Forman et al., 1997; Delgado et al., 2007; Hayati et al., 2013), levando à perdas em habitats e mudanças nas paisagens (Forman e Alexander, 1998; Geneletti, 2003; Hayati et al., 2013).

A literatura vem descrevendo estradas como um dos determinantes mais fortes e consistentes do desmatamento, especialmente em florestas tropicais (Angelsen e Kaimowitz, 1999; Geist e Lambin, 2002; Rudel et al., 2009; Pfaff et al., 2013; Ferretti-Gallon e Busch, 2017; Kaczan et al., 2020). A construção de estradas através dos trópicos é, portanto, uma preocupação urgente para a conservação (Laurance e Balmford, 2013; Barber et al., 2014; Laurance et al., 2014; Bicknell et al., 2015; Edwards et al., 2017), sobretudo é necessária mais atenção para avaliar os impactos a longo prazo das estradas de exploração madeireira, que permanecem na paisagem muito tempo após a conclusão da exploração (Gullison e Hardner, 1993; Ernst et al., 2016; Edwards et al., 2017).

Hoje em dia, mudanças na paisagem com predomínio de uso florestal decorrentes da construção de estradas impõem, cada vez mais, impactos ambientais aos ecossistemas florestais (Hayati et al., 2013). E a construção e manutenção de estradas florestais têm o potencial de serem as atividades mais dispendiosas e destrutivas nas operações florestais (Larsen e Parks, 1997; Akay, 2006; Najafi et al., 2008), especialmente se os padrões fundamentais de projeto não forem implementados (Tampekis et al., 2015).

Uma rede de estradas bem planejada é essencial para o manejo sustentável dos recursos florestais (Demir, 2007; Gumus et al., 2008; Hayati et al., 2012b), independentemente do uso da floresta, como produção de madeira, ecoturismo, abastecimento de água ou conservação do solo (Lugo e Gucinski, 2000; Gaodi et al., 2010; Hayati et al., 2012b). E o acesso às florestas para operações madeireiras e manejo sustentável dos recursos florestais só pode ser alcançado por meio de uma rede de estradas florestais adaptadas individualmente (Demir, 2007; Abdi et al., 2009; Hayati et al., 2013).

Para alcançar uma utilização adequada do ecossistema natural, as capacidades ecológicas da paisagem devem ser definidas com base em estudos científicos e técnicos (Fahrig, 1997; Makhdoum, 2002; Hayati et al., 2012b). Além disso, devem ser levados em consideração, a condição da floresta, a estrutura do solo, dados climáticos, fatores ambientais, infraestruturas, produtos florestais não-madeireiros e serviços, grupos de usuários de estradas, o valor do acesso à floresta e políticas nacionais (Potocnik, 1996; Bjorklund, 2005; Turk, 2019). Portanto, a avaliação dos impactos da construção de estradas sobre o meio ambiente, deve ser conduzida antes da construção da estrada para minimizar os impactos (Hayati et al., 2012b).

O planejamento da rede viária florestal é um desafio para o manejo florestal sustentável (Hippoliti, 1997; Çaliskan, 2013; Maesano et al., 2013; Tavankar et al., 2015; Laschi et al., 2016; Tavankar et al., 2018; Picchio et al., 2018), considerando que a sua construção é frequentemente vista como potencial causadora de impactos ambientais adversos (Laschi et al.,

2019). Conforme mencionado por muitos autores (Pinard et al., 1995; Pinard et al., 1996; Han et al., 2000; Sist et al., 2003; Tavankar et al., 2017a; Tavankar et al., 2017b) existem muitos fatores que influenciam o manejo florestal sustentável (Picchio et al., 2018). Os fatores dominantes incluem atividades madeireiras, intensidade de corte, habilidade dos operadores florestais, mecanização, nível de planejamento da operação madeireira, condições do local e densidade das estradas (Picchio et al., 2018). Portanto, a nova prioridade dada à proteção ambiental envolve o repensar da construção de estradas tanto em suas linhas gerais quanto em seus detalhes técnicos (Marchi et al., 2018; Laschi et al., 2019).

O acesso à floresta não pode mais ser considerado apenas uma das etapas da produção de madeira (Laschi et al., 2019). As estradas devem ser projetadas para satisfazer necessidades múltiplas, e sua construção deve envolver práticas adequadas para prevenir a degradação ambiental (Spinelli e Marchi, 1998; Laschi et al., 2019), especialmente para proteger nichos ecológicos específicos e a biodiversidade (Picchio et al., 2018; Laschi et al., 2019). Portanto, uma malha viária florestal bem projetada, devidamente utilizada e mantida, apresenta baixo impacto ambiental e facilita a aplicação dos melhores sistemas de extração e transporte, contribuindo consideravelmente para a gestão da sustentabilidade florestal (Magagnott et al., 2012; Picchio et al., 2011; Picchio et al., 2012a; Picchio et al., 2012b; Marchi et al., 2014, Picchio et al., 2018).

Devido aos impactos ambientais, o planejamento da rede de estradas florestais precisa abordar os aspectos ecológicos (Tampekis et al., 2015), ou seja, considerar características da hidrologia, topografia e características do solo local. Muitos estudos, portanto, têm se concentrado apenas no controle de escoamento superficial e manutenção em estradas florestais por diferentes abordagens (Muneoka et al., 2014; Masumian et al., 2017; Yoshida et al., 2018) e perspectivas de planejamento (Thompson et al., 2010; Pellegrini et al., 2013; Yoshida et al., 2018), o que não é suficiente considerando todas as interações das estradas com atividades florestais e a paisagem.

Em terrenos florestais, a caracterização topográfica deve ser realizado de forma rigorosa entre outras tarefas orientadas às medidas, devido às restrições ecológicas em áreas tão sensíveis ao meio ambiente (Akgul et al., 2017). Pode-se citar o modelo digital de elevação (MDE) do terreno como uma importante caracterização topográfica da paisagem, que serve como base para a elaboração de outros mapas, como índice topográfico de umidade, aspecto, declividade etc., não só para análise da rede viária, mas como da floresta na totalidade. O MDE, por exemplo, permite visualizar os cursos de água por meio do processamento dos dados topográficos, sendo utilizado para o layout dos sistemas de drenagem (Murphy et al., 2007;

Yoshida et al., 2018) permitindo realizar minimizações de custos e erosão do solo (Akay e Sessions, 2005; Aruga et al., 2005; Yoshida et al., 2018).

Construir uma extensa rede de estradas é um investimento de capital considerável e requer abordagens de planejamento precisas e econômicas. Uma densa rede de estradas diminui os custos de transporte florestal, mas aumenta os custos de manutenção (Lopatian et al., 2015; Havimo et al., 2017).

Como em estradas secundárias as operações de colheita conectam geralmente estradas principais ou primárias, a densidade delas pode se tornar maior do que nas estradas principais (Pentek et al., 2008). Se as estradas não forem construídas adequadamente, elas podem aumentar os deslizamentos de terra ou a erosão do solo em grande escala (Tarolli et al., 2013). Além disso, em estradas secundárias, o tráfego é menor e os veículos são conduzidos a velocidades mais baixas em comparação com as estradas florestais principais, como observado por Kizha et al. (2015). No entanto, a frequência e a qualidade da manutenção são sempre uma questão econômica, como destacado por Yoshida et al. (2018).

Conseqüentemente, as condições técnicas, econômicas, sociais e ambientais devem ser consideradas durante a construção das estradas florestais (Akay e Sessions, 2005). As características de construção devem diferir, dependendo do tipo de maquinário que se espera que funcione em diferentes ramais da estrada. Em particular, largura, inclinação e raio de curvatura são os elementos mais importantes para estradas florestais, que podem limitar a trafegabilidade dos veículos (ou seja, dimensões e carga útil dos veículos) (Laschi et al., 2016).

As estradas florestais são elementos complexos, demorados e caros das operações florestais (Akgul et al., 2016; Akay et al., 2018b), porque o projeto, construção e manutenção exigem processos de engenharia relevantes (Sessions, 2007). E as operações florestais no geral incluem projeto de estradas florestais e estabilidade de taludes, análise de sistemas de colheita para eficiência econômica e proteção do local, planejamento e programação de colheitas, além de sistemas de transporte (Çalişkan et al., 2019) e é a parte mais cara e demorada de um plano de operação de colheita florestal (Tan, 2000; Ghajar et al., 2013; Parsakhoo, 2016), portanto, é crucial se ter um bom planejamento de estradas.

A literatura classifica o planejamento de estradas florestais em três níveis hierárquicos: estratégico, tático e operacional (Gromskaya e Simonenkov, 2016; Pentek et al., 2014; Grigolato et al., 2017; Kazama et al., 2021), classificação essa já defendida por Bateman e Snel (1998), como sendo importante para as empresas na gestão da sua administração. O planejamento estratégico consiste no planejamento inicial, que visa estabelecer diretrizes futuras ao longo prazo de aproximadamente cinco anos ou mais (Gromskaya e Simonenkov,

2016). Este nível de planejamento envolve a definição de modelos aplicáveis de acordo com aspectos da topografia e uma densidade de malha viária adequada (Pentek et al., 2014; Kazama et al., 2021). Também é considerado no processo de planejamento estratégico o acesso à área de colheita e as diretrizes para um sistema de extração adequada, considerando as estradas existentes e se houver necessidade de construção de novas estradas (Gromskaya e Simonenkov, 2016).

No nível tático, o planejamento é um nível intermediário entre estratégico e operacional, com um horizonte de planejamento de médio prazo. Envolve questões como o planejamento no nível de uma determinada unidade econômica, o que leva ao planejamento em um nível mais local (D'amours et al., 2008). Para minimizar os custos e impactos ao ecossistema florestal causados pela construção de estradas florestais e operações madeireiras, é essencial determinar as redes ótimas de infraestrutura primária para o transporte de toras (Pentek et al., 2014).

Após concluir o processo de planejamento tático, cujo resultado é uma rede de estradas florestais otimizada, o planejamento operacional é iniciado (Kazama et al., 2021). Neste nível, o planejamento envolve questões como a construção de cada tipo e categoria de estrada florestal, de acordo com seu projeto, análise do alinhamento da estrada e da rota ideal (Pentek et al., 2014) seguida de construção, escavação e manutenção (Gromskaya e Simonenkov, 2016).

O planejamento e o projeto de estradas florestais são essenciais para que os processos produtivos sejam realizados de forma eficiente, segura, confortável e econômica (Abeli, 2000; Aruga, 2005). Vários estudos têm sido publicados sobre automação da localização de estradas (Akay e Sessions, 2005; Aruga, 2005; Rogers, 2005; Stückelberger et al., 2007; Enache et al., 2013) ou apenas considerando o impacto das estradas florestais no meio ambiente (Coulter, 2004; Akay et al., 2004; Enache et al., 2013).

O planejamento manual das estradas considerando os aspectos técnicos e ambientais é um trabalho difícil (Babapour et al., 2013). Mais recentemente, a gestão simultânea de informações com relação aos fatores efetivos no planejamento de estradas e avaliação rápida das estradas tem sido possível utilizando as capacidades do Sistema de Informação Geográfica (SIG) (Pentek et al., 2005; Gumus et al., 2008; Babapour et al., 2013). Muitas tentativas têm sido feitas para utilizar SIG no processo de planejamento de estradas (Dean, 1997; Tan, 1999; Gumus et al., 2008; Najafi et al., 2008; Babapour et al., 2013), pois métodos convencionais de planejamento viário baseados em mapas topográficos não permitem que engenheiros florestais criem um número suficiente de alternativas viárias (Chung e Sessions, 2001; Çalişkan, 2017).

Em outros estudos recentes, questões técnicas e princípios geométricos de estradas, foram considerados em combinação com outros fatores na seleção de estradas florestais ideais,

incluindo declividade, aspecto, solo, volume de árvores por hectare, bem como considerações ecológicas usando SIG (Ariel e Lugo, 2000; Akay et al., 2004; Akay e Sessions, 2005; Aruga et al., 2005; Stuckelberger et al., 2007; Babapour et al., 2013). Ahmadi et al. (2005) avaliaram alguns fatores, incluindo geologia, erosão, solo (textura e classificação do solo), inclinação, uso do solo, cursos de água, falhas e altitude com base em questionários.

Session et al. (2001) analisaram os efeitos da estabilidade de taludes na escolha da rede viária utilizando SIG e afirmaram que as regiões com áreas com declive médio são mais estáveis. Musa e Mohamed (2002) também implementaram o planejamento de estradas florestais utilizando SIG, comparando o planejamento rodoviário com outros métodos, incluindo planejamento baseado em campo e baseado em escritório, e a melhor análise de estradas para uma rede viária florestal foi a partir do SIG. Hosseini (2003) na floresta de montanha no norte do Irã, mostrou que a rede viária projetada usando SIG foi mais adequada e melhor do que a rede viária existente projetada apenas com base na acessibilidade, distâncias de derrapagem, danos ambientais, custos de construção e escavação.

Consequentemente, é necessária uma abordagem funcional que considere todos os fatores tecnológicos, econômicos e ambientais no planejamento das redes viárias, de modo que os custos econômicos e ambientais sejam minimizados (Hayati et al., 2013). No entanto, lidar com tantas variáveis e restrições não é uma tarefa fácil para os planejadores e gestores florestais (Enache et al., 2013). Para isso, o uso do SIG combinado com critérios espaciais múltiplos vem sendo utilizado para o planejando de estradas florestais (Çalışkan, 2017), e pode-se citar as técnicas de tomada de decisão multicriterial como ferramentas úteis para criar uma área modelo (Çalışkan, 2017).

A combinação de técnicas disponíveis nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Avaliação multicriterial (AMC), proporcionam a conveniência aos usuários na determinação das várias alternativas de critérios e objetos com estruturas múltiplas e complexas (Çalışkan, 2017). A AMC proporciona a integração das informações por meio da comparação das alternativas com respeito aos critérios selecionados (Malczewski, 1999; Şener, 2004; Kesgin e Ersoy, 2006; Anavberokhai, 2008). Os métodos multicritérios são ferramentas interativas e flexíveis para a análise da complexidade entre as alternativas, que contêm diferentes fatores ambientais e socioeconômicos (Çalışkan et al., 2019).

Destaca-se que nos últimos anos, houve um rápido aumento no interesse e pesquisa sobre os métodos multicritérios baseados em SIG (Çalışkan et al., 2019). Alguns pesquisadores têm realizado análises de redes viárias baseadas em SIG e tomada de decisões multicritérios, considerando, fatores como volume de madeira, inclinação, condição do solo, distância entre

estradas florestais existentes, tipo de solo, geologia, hidrografia, elevação e tipo de árvore, além de fatores ambientais (Sadek et al., 1999; Hosseini e Solaymani, 2006; Jusoff, 2008; Mohammadi Samani et al., 2010; Hayati et al., 2012b; Norizah, 2012; Çalışkan, 2013; Pellegrini et al., 2013; Tampekis et al., 2015; Laschi et al., 2016; Çalışkan, 2017).

Consequentemente, se deve citar que as abordagens de lógica fuzzy (difusa) são utilizadas para aumentar a precisão da avaliação multicritério, apoiando a formação de modelos de conformidade com dados reais (Zadeh, 1965; Acar et al., 2017). Ao contrário do planejamento manual de estradas, o processo hierárquico analítico (AHP, do inglês *Analytic Hierarchy Process*) possibilita utilizar as sugestões de diferentes especialistas e calcular o coeficiente de incompatibilidade, além de utilizar critérios quantitativos e qualitativos. A escolha precisa das variáveis e de seus pesos é considerável para a precisão dos resultados do método AHP (Babapour et al., 2013). Destaca-se que a AHP clássica é um dos métodos de avaliação de risco mais comumente usados por tomadores de decisão e pesquisadores (Vaidya e Kumar, 2006; Akay et al., 2018b).

Por outro lado, uma vez que os julgamentos humanos são expressos em valores exatos no método do processo de análise hierárquica, os tomadores de decisão continuam incapazes para lidar adequadamente com julgamentos indefinidos e imprecisos (Javanbarg et al., 2012). A AHP fuzzy obtida pela combinação da teoria do conjunto fuzzy e do método AHP, fornece uma descrição mais precisa do processo de tomada de decisão (Huang et al., 2008), e tem sido usada em estudos de avaliação de risco em diferentes âmbitos (Tian e Yan, 2013; Zhang et al., 2018).

Estes estudos supracitados demonstram os avanços na utilização do SIG e dos diversos métodos de tomada de decisão, análise e otimização, evidenciando a importância da investigação em estradas florestais com diferentes variáveis e metodologias aplicadas nas diferentes florestas e níveis de planejamento (Kazama et al., 2021).

Portanto, a implementação de medidas ecologicamente e economicamente corretas, assim como planos rodoviários tecnicamente adequados, são necessários (Turk, 2019). A motivação principal do estudo é apresentar uma abordagem para o planejamento de estradas florestais que seja focada na conservação hidrológica, topográfica e estabilidade dos solos, com o uso da avaliação multicritério no Sistema de Informação Geográfica (SIG).

## Referências

- Abdi, E., Majnounian, B., Darvishsefat, A., Mashayekhi, Z., Sessions, J. A GIS-AMC based model for forest road planning. **Journal of Forest Science**, v. 55, n. 4, p. 171–176, 2009. doi:10.17221/52/2008-jfs.
- Abeli, W. S., Meiludie, O., Kachwele, R. Road Alignment and Gradient Issues in the Maintenance of Logging Roads in Tanzania. **International Journal of Forest Engineering**, v. 11, n.2, p. 22–29, 2000. doi: 10.3846/08435243.2000.10702750
- Acar, H. H., Dursun, E., Gulci, S., Gumus, S. Assessment of Road Network Planning by Using GIS-based Multi-Criteria Evaluation for Conversion of Coppice Forest to High forest. **Fresen. Environ. Bull**, v. 26, n.3, p. 2380-2388, 2017.
- Aguiar, M. O., Fernandes da Silva, G., Mauri, G. R., Ferreira da Silva, E., Ribeiro de Mendonça, A., Martins Silva, J. P., Silva, R. F., Santos, J. S., Lavagnolo, G. L., Figueiredo, E. O. Metaheuristics applied for storage yards allocation in an Amazonian sustainable forest management area. **Journal of Environmental Management**, v. 271, 110926, 2020. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110926.
- Ahmadi, H., Darvishsafat, A., Makhdom, M., Abolghasemi, S. Designing of road based on environmental issues using GIS. *In: Proceedings of the Geomatic congress, Tehran, Iran, 8 pp, 2005.*
- Akay, A. E. Minimizing total costs of forest roads with computer-aided design model. **Sadhana**, v.31, n. 5, p. 621–633, 2006. doi: 10.1007/bf02715918
- Akay, A. E., Karas, J. R., Sessions, J., Yuksel, A., Bozali, N., Gundogan, R. Using high resolution digital elevation model for computer aided forest road design. **Proceedings of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress Istanbul, VII (B7)**, p.1682–1750, 2004.
- Akay, A. E., Sessions, J. Applying the decision support system, TRACER, to forest road design. **West J Appl For**, v.20, n.3, p.184–191, 2005. doi: 10.1093/wjaf/20.3.184

Akay, A. O., Akgul, M., Demir, M. Determination of Temporal Changes on Forest Road Pavement with Terrestrial Laser Scanner. **Fresen. Environ. Bull**, v.27, n.3, p. 1437-1148, 2018a.

Akay, A. O., Demir, M., Akgul, M. Assessment of risk factors in forest road design and construction activities with fuzzy analytic hierarchy process approach in Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.190, n.9, 2018b. doi: 10.1007/s10661-018-6948-0.

Akgul, M., Demir, M., Ozturk, T., Topatan, H., Budak, Y. E. Investigation of recreational vehicles maneuverability on forest roads by computer-aided driving analysis. **Baltic Journal of Road & Bridge Engineering**, v. 11, n. 2, p. 111–119, 2016.

Akgul, M., Yurtseven, H., Gulci, S., Akay, A. E. Evaluation of UAV- and GNSS-Based DEMs for Earthwork Volume. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v.43, n. 4, p.1893–1909, 2017. doi: 10.1007/s13369-017-2811-9.

Álvarez-Miranda, E., Garcia-Gonzalo, J., Ulloa-Fierro, F., Weintraub, A., Barreiro, S. A multicriteria optimization model for sustainable forest management under climate change uncertainty: an application in Portugal. **Eur J Oper Res**. v.269, p.79–98, 2018. doi: 10.1016/j.ejor.2017.04.052

Anavberokhai, I. O. **Introducing GIS and Multi- Criteria analysis in road path planning process in Nigeria**. 36 p, 2008. MsC Thesis, University of Gavle, Department of Technology and Built Environment, Nigeria.

Angelsen, A., Kaimowitz, D. Rethinking the causes of deforestation: Lessons from economic models. **The World Bank Research Observer**, v. 14, p. 73–98, 1999. doi: 10.1093/wbro/14.1.73.

Ariel, E., Lugo, H. G. Function, effects, and management of forest roads, appropriately. **For. Ecol. Manag**, v.133, n.3, p. 249–262, 2000. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00237-6

Arnaez, J., Larrea, V., Ortigosa, L. Surface Runoff and Soil Erosion on Unpaved Forest Roads from Rainfall Simulation Tests in Northeastern Spain. **Catena**, v. 57, n.1, p. 1–14, 2004. doi: 10.1016/j.catena.2003.09.002.

- Aruga, K. Tabu search optimization of horizontal and vertical alignments of forest roads. **Journal of Forest Research**. v. 10, n.4, p.275–284, 2005. doi: 10.1007/s10310-004-0136-5
- Aruga, K., Sessions, J., Miyata, E.S. Forest road design with soil sediment evaluation using a high-resolution DEM. **J For Res**. v. 10, p. 471–479, 2005.
- Babapour, R., Naghdi, R., Salehi, A., Ghajar, I. A Decision Support System for Allocation of Mountain Forest Roads Based on Ground Stability. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 1, p. 199–205, 2013. doi: 10.1007/s13369-013-0833-5.
- Baldini, S., Pollini, C. **Interaction entre viabilite forestiere et systemes de recolte du bois**. *In: Seminar on environmentally sound forest roads and wood transport*. p. 17–22 June, Sinaia (Romania), FAO, 1998, 443 p.
- Bateman, T. Snell, S. **Administração: construindo vantagem competitiva**. São Paulo: Atlas, 1998, 546 p.
- Barber, C. P., Cochrane, M. A., Souza Jr., C. M., Laurance, W. F. Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. **Biol. Conserv.**, v.177, p. 203–209, 2014. doi: 10.1016/j.biocon.2014.07.004
- Baskent, E. Z., Keles, S. Spatial forest planning a review. **Ecol Modell.**, v. 188, n. 2-4, p.145–173, 2005. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.01.059.
- Bicknell, J. E., Gaveau, D. L. A., Davies, Z. G., Struebig, M. J. Saving logged tropical forests: closing roads will bring immediate benefits. **Front. Ecol. Environ**, v.13, n. 2, p. 73–74, 2015. doi: 10.1890/15.WB.001
- Bjorklund, E. S. Environmental Statement 2005. Wood Supply Europe Report, Stora Enso Forest Product, Sweden. 3, 2005.
- Çalışkan, E. Planning of forest road network and analysis in mountainous area. **Life Science Journal**. v.10, n. 2, p. 2456-2465, 2013.

Çalışkan, E., Bediroglu, Ş., 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. doi: 10.15666/aeer/1701\_759779.

Çalışkan, E., Karahalil, U. Evaluation of forest road network and determining timber extraction system using GIS: a case study in Anbardağ planning unit. **Šumarski list**, v. 141, n. 3-4, p. 163-171, 2017. doi.org/10.31298/sl.141.3-4.6.

Calvani, G., Marchi, E., Piegai, F., Tesi, E. Funzioni, classificazione, caratteristiche e pianificazione della viabilità forestale per l'attività di antincendio boschivo. **L'Italia Forestale e Montana**, v. 54, n. 3, p. 109–125, 1999.

Chung, W., Sessions, J. Designing a forest road network using heuristic optimization techniques. **Council Engineering (COFE) Conference Proceedings: Appalachian Hardwoods: Managing Change” Snowshoe**, p.15-18, 2001.

Coulter, E. D. **Setting forest road maintenance and upgrade priorities based on environmental effects and expert judgment**. PhD Dissertation, Oregon State University Corvallis, 199 p, 2004.

D'amours, S., Rönnqvist, M., Weintraub, A. Using Operational Research for supply chain planning in the forest products industry. **INFOR**, v. 46, n. 4, p. 265–281, 2008. doi: 10.3138/infor.46.4.265. doi:10.3138/infor.46.4.265

Dean, J. D. Finding optimal routes for networks of harvest site access roads using GIS\_based techniques. **Can. J. F. Res.** v. 27, n.1, p. 11–22, 1997. doi:10.1139/cjfr-27-1-11

Delgado, J. D., Arevalo, J. R., Fernandez-Palacios, J. M. Road Edge Effect on the Abundance of the Lizard Gallotia galloti (Sauria: Lacertidae) in Two Canary Islands Forests. **Biodivers. Conserv**, v. 16, n. 10. p. 2949–2963, 2007. doi:10.1007/s10531-007-9154-x

Demir, M. Impacts, Management and Functional Planning Criterion of Forest Road Network System in Turkey. **Transport. Res. A-Pol.**, v. 41, n.1, p. 56–68, 2007. doi:10.1016/j.tra.2006.05.006

Demir, M., Makineci, E., Kartaloglu, M. Temporal Sediment Production of Paved and Unpaved Forest Roads. **Fresen. Environ. Bull**, v.21, n. 5, p. 1180-1185, 2012.

Edwards, F. A., Finan, J., Graham, L. K., Larsen, T. H., Wilcove, D. S., Hsu, W. W., Chey, V.K., Hamer, K. C. . The impact of logging roads on dung beetle assemblages in a tropical rainforest reserve. **Biological Conservation**, v. 205, p. 85–92, 2017. doi:10.1016/j.biocon.2016.11.011.

Enache, A., Ciobanu, V. D., Kühmaier, M., Stampfer, K. An Integrative Decision Support Tool for Assessing Forest Road Options in a Mountainous Region in Romania. **Croat. J. For. Eng.**, v. 34, n. 1, p. 43–60, 2013.

Erdem, R., Enez, K., Demir, M. Sariyildiz, T. Slope Effect on the Sediment Production of Forest Roads in Kastamonu of Turkey. **Fresen. Environ. Bull**, v. 27, p. 2019-2025, 2018.

Ernst, R., Holting, M., Rodney, K., Benn, V., Thomas-Caesar, R., Wegmann, M. A frog's eye view: logging roads buffer against further diversity loss. **Front. Ecol. Environ**, v.14, n.7, p. 353–355, 2016. doi: 10.1002/fee.1314

Fabiano, F., Marchi, E. Pianificazione della viabilità forestale. *In Seminario UNIF: Il bosco e i suoi valori: esperienze e prospettive per la pianificazione forestale.* Brasimone (BO), p. 196–201, 1991.

Fahrig, L. Relative effects of habitat loss and fragmentation on population extinction. **Journal of Wildlife Management**, v. 61, n. 3, p. 603–610, 1997.

Ferretti-Gallon, K., Busch, J. What drives deforestation and what stops it? A meta-analysis of spatially explicit econometric studies. **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 11, p. 3–23, 2017. doi:10.2139/ssrn.2458040

Forman, R. T. T., Alexander, L. E. Roads and Their Major Ecological Effects. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, v. 29, n.1, p. 207–231, 1998. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207

Forman, R. T. T., Friedman, D.S., Fitzhenry, D., Martin, J.D., Chen, A.S., Alexander, L.E. Ecological Effects of roads: toward three summary indices and an overview for North America. *In: Canters, K., Piepers, A., Hendriks-Heersma, D. (Eds.), Proceedings Habitat Fragmentation and Infrastructure.* Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Delft, The Netherlands, p. 40–54, 1997.

Forsyth, A. R., Bubb, K. A., Cox, M. E. Runoff, Sediment Loss and Water Quality from Forest Roads in a Southeast Queensland Coastal Plain *Pinus* Plantation. **For. Ecol. Manag.**, v. 221, n. 1–3, p. 194–206, 2006.

Fu, B., Newham, L. T. H., Ramos-Scharron, C. E. A Review of Surface Erosion and Sediment Delivery Models for Unsealed Roads. **Environ. Modell. Softw.**, v.25, n.1, p. 1–14, 2010. doi: 10.1016/j.envsoft.2009.07.013

Gaodi, X., Wenhua, L., Yu, X., Biao, Z., Chunxia, L., Kai, A., Jixing, W., Kang, X., Jinzeng, W. Forest ecosystem services and their values in Beijing. **Chinese Geographical Science**, v. 20, n.1, p. 51-58, 2010. doi: 10.1007/s11769-010-0051-y.

Geist, H. J., Lambin, E. F. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. **BioScience**, v.52, n.2, p. 143–150, 2002. doi: 10.1641/0006-3568(2002)052[0143:pcaudf]2.0.co;2

Geneletti, D. Biodiversity impact assessment of roads: an approach based on ecosystem rarity. **Environmental Impact Assessment Review**, v.23, n.3, p. 343-365, 2003. doi: 10.1016/S0195-9255 (02)00099-9.

Ghajar, I., Najafi, A., Karimimajd, A. M., Boston, K., Torabi, S. A. A program for cost estimation of forest road construction using engineer's method. **For Sci Tech**, v.9, n.3, p.111-117, 2013. doi: 10.1080/21580103.2012.759163

Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., Goodess, C.M. Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming. **Global and Planetary Change**, v.68, n.3, p. 209–224, 2009. doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.06.001

Gios G, Clauser O. Forest and tourism: economic evaluation and management features under sustainable multifunctionality. **iForest**, v.2, n.5, p. 192-197, 2009. doi: 10.3832/ifor0514-002

Grigolato, S., Mologni, O., Cavalli, R. GIS applications in forest operations and road network planning: An overview over the last two decades. **Croat. J. For. Eng**, v.38, n.2, p.175–186, 2017.

Gromskaya, L.Y., Simonenkov, M.V. Current Status of Modeling and Optimization of Forest Roads. **Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)**, v.179, n.5, p.108–122, 2016. doi: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.108

Gullison, R. E., Hardner, J. J. The effects of road design and harvest intensity on forest damage caused by selective logging – empirical results and a stimulation-model from Bosque Chimanes, Bolivia. **For. Ecol. Manag.**, v.59, n. 1-2, p. 1–14, 1993. doi: 10.1016/0378-1127(93)90067-W

Gumus, S., Acar, H. H., Toksoy, D. Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.142, n.1-3, p. 109–116, 2008. doi: 10.1007/s10661-007-9912-y.

Han, H. S., Kellogg, L. D. Damage characteristics in young Douglas-fir stands from commercial thinning with four timber harvesting systems. **West. J. Appl. For.**, v.15, n.1, p. 27–33, 2000. doi: 10.1093/wjaf/15.1.27

Havimo, M., Mönkönen, P., Lopatin, E., Dahlin, B. Optimising forest road planning to maximise the mobilisation of wood biomass resources in Northwest Russia. **Biofuels**, v.8, n.4, p. 501–514, 2017. doi:10.1080/17597269.2017.1302664.

Hayati, E., Abdi, E., Majnounian, B., Makhdom, M. Application of Sensitivity Analysis in Forest Road Networks Planning and Assessment. **JAST**, v.15, n.4, p. 781-792, 2013.

Hayati, E., Majnounian, B., Abdi, E. Qualitative evaluation and optimization of forest road network to minimize total costs and environmental impacts. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 5, n.3, p.121–125, 2012a. doi: 10.3832/ifor0610-009.

Hayati, E., Majnounian, B., Abdi, E., Sessions, J., Makhdom, M. An expert-based approach to forest road network planning by combining Delphi and spatial multi-criteria evaluation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.185, n.2, p.1767–1776, 2012b. doi: 10.1007/s10661-012-2666-1.

Hinterstoisser, H. **Mehr Umwelterziehung – Ökologische Mindeststandards – Stufenplan für Walderschliessung.** Österreichische Forstzeitung (1):1990, 21p.

Hippoliti, G. **Appunti di Meccanizzazione Forestale**; Società Editrice Fiorentina: Firenze, Italy, 1997, 320 p.

Hosseini, S. A., Solaymani, K. Investigation of effective factors for path tracing using GIS in Kheyroud forest (Iran-Mazadaran province). **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v.9, n.11, p. 2055–2061, 2006. doi: 10.3923/pjbs.2006.2055.2061

Hosseini, S.A. **Planning of Forest Roads Network Using GIS**, Khiroudkenar Forest, 2003, 145 f., Ph.D. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Huang, C.C., Chu, P.Y., Chiang, Y. H. A fuzzy AHP application in government-sponsored R&D project selection. **Omega**, v.36, n.6, p.1038–1052, 2008. doi: 10.1016/j.omega.2006.05.003

Intergovernmental Panel on Climate Change. Core writing team, Pachauri RK, Meyer LA, editors. 2014. Climate change 2014: synthesis report, contribution of working groups I, II and III to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC.

Javanbarg, M. B., Scawthorn, C., Kiyono, J., Shahbodaghkhan, B. Fuzzy AHP-based multicriteria decision-making systems using particle swarm optimization. **Expert Systems with Applications**, v.39, n.1, p. 960–966, 2012. doi: 10.1016/j.eswa.2011.07.095

Jordán-López, A., Martínez-Zavala, L., Bellinfante, N. Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area. **Science of the Total Environment**, v.407, n.2, p.937–944, 2009. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.047

Jusoff, K. Construction of new forest roads in Malaysia using a GIS-based decision support system. **Computer and Information Science**, v.1, n.3, p.48–59, 2008. doi: 10.5539/cis.v1n3p48

Kaczan, D. J. Can roads contribute to forest transitions? **World Development**, v.129, 104898, 2020. doi: 10.1016/j.worlddev.2020.104898

Kazama, V. S., Corte, A. P. D., Robert, R. C. G., Sanquetta, C. R., Arce, J. E., Oliveira-Nascimento, K. A., DeArmond, D. Global review on forest road optimization planning: Support

for sustainable forest management in Amazonia. *Forest Ecology and Management*, v.492, n.119159, 2021. doi:10.1016/j.foreco.2021.119159.

Kesgin, B., Ersoy, E. **Peyzaj Planlamada Coğrafi Bilgi Sistemi Aracı Olarak Konumsal Karar Destekleme Sisteminin Uygulanması** (Application GIS and Spatial Multicriteria decision), IV. Coğrafi Bilgi Sistemleri Gunleri, Fatih Universitesi, İstanbul, 2006.

Kizha, A. R., Han, H. S., Montgomery, T., Hohl, A. Biomass power plant feedstock procurement: modeling transportation cost zones and the potential for competition. *Calif Agric*, v.69, p.184–190, 2015. doi: 10.3733/ca.v069n03p184

Krč J, Beguš J. Planning forest opening with forest roads. *Croat J For Eng*, v.34, n.2, p.217–228, 2013.

Larsen, M. C., Parks, J. E. The association of roads and mass-wasting in a forested mountain environment. *Earth Surf Processes Landf*, v. 22, p.835–848, 1997.

Laschi, A., Foderi, C., Fabiano, F., Neri, F., Cambi, M., Mariotti, B., Marchi, E. Forest road planning, construction and maintenance to improve forest fire fighting: a review. *Croat. J. For. Eng*, v. 40, p.207–219, 2019.

Laschi, A., Neri, F., Montorselli, N.B., Marchi, E. A methodological approach exploiting modern techniques for forest road network planning. *Croat. J. For. Eng*, v.37, n.2, p.319–331, 2016.

Laurance, W. F., Balmford, A. A global map for road building. *Nature*, v.495, n. 7441, p. 308–309, 2013. doi: 10.1038/495308a

Laurance, W. F., Clements, G. R., Sloan, S., O’Connell, C. S., Mueller, N. D., Goosem, Venter, O., Edwards, D. P., Phalan, B., Balmford, A., Ree, R. V. D., Arrea, I. B. A global strategy for road building. *Nature*, v. 513, n.7517, p.229–232, 2014. doi:10.1038/nature13717.

Leung, F. T. Y., Yan, W. M., Hau, B. C. H., Tham, L. G. Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability. *Catena*, v.125, p.102–110, 2015. doi: 10.1016/j.catena.2014.10.018

- Lopatin E, Trishkin M, Kobayakov K, et al. The analysis of sustainable forest management practices within 100 km radius around Segezha PPM. **Sustain Forest Manage**, v. 2, n. 42, p.10–17, 2015.
- Lotfalian, M., Babadi, TY, Akbari, H. Impactos dos tratamentos de estabilização do solo na redução da perda de solo e do escoamento superficial em taludes de estradas florestais em florestas hircanianas. **Catena**, v.172, p. 158-162, 2019. doi: 10.1016/j.catena.2018.08.023.
- Lugo, A. E., Gucinski, H. Function, effects, and management of forest roads. **Forest Ecology and Management**, v.133, n.3, p.249–262, 2000. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00237-6
- Maesano, M., Picchio, R., Lo Monaco, A., Neri, F., Lasserre, B., Marchetti, M. Productivity and energy consumption in logging operation in a Cameroonian tropical forest. **Ecol. Eng.**, v.57, p.149–153, 2013. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.013
- Magagnotti, N., Spinelli, R., Güldner, O., Erler, J. Site impact after motor-manual and mechanised thinning in Mediterranean pine plantations. **Biosyst. Eng.**, v.113, n.2, p.140–147, 2012. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.07.001
- Makhdoum, M. F. Degradation model: a quantitative EIA Instrument, acting as a decision support system (DSS) for environmental management. **Environmental Management**, v.30, n.1, p.151–156, 2002. doi: 10.1007/s00267-001-2647-6
- Makineci, E., Demir, M., Kartaloglu, M. Temporal Changes in Carbon and Nitrogen Levels in Sediment from Paved and Unpaved Forest Roads. **Fresen. Environ. Bull**, v.24, n.8, p.2484–2489, 2015.
- Malczewski, J. **GIS and multicriteria decision analysis**. New York: John Wiley and Sons, 1999, 408p.
- Marchi, E., Chung, W., Visser, R., Abbas, D., Nordfjell, T., Mederski, P., McEwan, A., Brink, M., Laschi, A. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. **Science of the Total Environment**, v.634, p.1385–1397, 2018. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.084.

- Marchi, E., Picchio, R., Spinelli, R., Verani, S., Venanzi, R., Certini, G. Environmental impact assessment of different logging methods in pine forests thinning. **Ecol. Eng.**, v.70, p. 429–436, 2014. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.06.019
- Marinelli, A. Passata l'emergenza parliamo d'incendi. **Annali dell'Accademia Italiana di Scienze Forestali**, v.43, p.31– 52, 1994.
- Masumian, A., Naghdi, R., Zenner, E.K. Effectiveness of water diversion and erosion control structures on skid trails following timber harvesting. **Ecol Eng**, v.105, p.370–378, 2017. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.05.017
- Mohammadi Samani, K., Hosseiny, S. A., Lotfalian, M., Najafi, A. Planning road network in mountain forests using GIS ve analytic hierarchical process (AHP). **Caspian Journal of Environmental Sciences**, v.8, n.2, p.151–162, 2010.
- Moriondo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., Corte-Real, L. Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. **Climate Research**, v.31, n.1, p.85–95, 2006.
- Muneoka H, Shiratori R, Usuda, H., Furukawa, K., Sakurai, R., Sakai, H. The effectiveness and features of the rolling-grade drainage method in spur roads (Special issue.Technical challenges of roads development I). **J Japan for Eng. Soc.**, v.29, p.13–20, 2014.
- Murphy, P. N. C., Ogilvie, J., Castonguay, M., Meng, F. R., Arp, P. A. Verifying calculated flow accumulation patterns of mapped and unmapped forest streams by culvert location. **For Chron**, v.83, n.2, p.198–206, 2007. doi: 10.5558/tfc83198-2
- Musa, M. K., Mohamed, A. N. Alignment locating forest road network by best-path modeling method, 6p, 2002. *In*: proceedings of 23rd Asian conference on remote sensing, Nepal.
- Najafi, A., Sobhani, H., Saeed, A., Makhdom, M., Mohajer, M. M. Planning and assessment of alternative forest road and skidding networks. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v.29, n.1, p.63–73, 2008.
- Norizah, K., Samani, M. Developing Priorities and Ranking for Suitable Forest Road Allocation using Analytic Hierarchy Process (AHP) in Peninsular Malaysia. **Sains Malaysiana**, v.41,n.10, p.1177–1185, 2012.

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, 2016. doi: 10.5424/fs/2016252-07815

Pellegrini, M., Grigolato, S., Cavalli, R. Spatial multi-criteria decision process to define maintenance priorities of forest road network: an application in the Italian Alpine region. **Croat J For Eng**, v.34, p.31–42, 2013.

Pentek, T., Neve, H., Por, T., Pi, D., Lepoglavec, K., Poto, I., Nevečerel, H., Poršinsky, T., Pičman, D., Lepoglavec, K., Igor, P. Methodology for development of secondary forest traffic infrastructure cadastre. **Croat J For Eng**, v.29, p.75–83, 2008.

Pentek, T., Nevečerel, H., Ecimović, T., Lepoglavec, K., Papa, I., Tomašić, Ž. Strategic planning of forest road network in Croatia - analysis of present situation as basis for future activities. **Nov. Meh. Sumar**, v.35, p. 63–78, 2014.

Pentek, T., Picman, D., Potocnik, I., Dvorscak, P., Nevecerel, H. Analysis of an existing forest road network. **Croat. J. For. Eng**, v.26, n.1, p. 39–50, 2005.

Pfaff, A., Amacher, G. S., Sills, E. O., Coren, M. J., Streck, C., Lawlor, K. Deforestation and forest degradation: Concerns, causes, policies, and their impacts, **Encyclopedia of energy. Natural Resource, and Environmental Economics**, v.2, p.144-149, 2013. doi:10.1016/B978-0-12-375067-9.00052-8.

Picchio, R., Pignatti, G., Marchi, E., Latterini, F., Benanchi, M., Foderi, C., Venanzi, R., Verani, S. The Application of Two Approaches Using GIS Technology Implementation in Forest Road Network Planning in an Italian Mountain Setting. **Forests**, v.9, n.5, p.277, 2018. doi: 10.3390/f9050277.

Picchio, R., Magagnotti, N., Sirna, A., Spinelli, R. Improved winching technique to reduce logging damage. **Ecol. Eng**, v.47, p.83–86, 2012a. doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.06.037

Picchio, R., Neri, F., Maesano, M., Savelli, S., Sirna, A., Blasi, S., Baldini, S., Marchi, E. Growth Effects of Thinning Damage in a Corsican Pine (*Pinus laricio* Poiret) Stand in Central Italy. **For. Ecol. Manag**, v.262, n.2, p.237–243, 2011. doi: 10.1016/j.foreco.2011.03.028

Picchio, R., Neri, F., Petrini, E., Verani, S., Marchi, E., Certini, G. Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy. **For. Ecol. Manag.**, v.285, p.38–43, 2012b. doi: 10.1016/j.foreco.2012.08.008

Pičman, D., Pentek, T. The influence of building and maintenance expenses of forest roads on their optimal density in low-lying forests of Croatia. *In Seminar on environmentally sound forest roads and wood transport*. 17–22. June, Sinaia (Romania): FAO, 1998, 443 p.

Pinard, M.A., Putz, F.E. Retaining forest biomass by reducing logging damage. **Biotropica**, v. 28, n.3, p.278–295, 1996.

Pinard, M.A., Putz, F.E., Tay, J., Sullivan, T.E. Creating timber harvest guidelines for a Reduced-Impact Logging Project in Malaysia. **J. For.**, v.93, n.10, p.41–45, 1995.

Potocnik, I. The multiple use of forest roads and their classification. *In: Food and Agriculture Organization of United Nations. Proceedings of the seminar on environmentally sound forest roads and wood transport*, Sinaia, 1996.

Ramos-Scharro'n, C. E., MacDonald, L. H. Runoff and suspended sediment yields from an unpaved road segment, St. John, US Virgin Islands. **Hydrological Processes**, v.21, n.1, p. 35–50, 2007. doi: 10.1002/hyp.6175

Rodriguez-Silva, F. Lecciones aprendidas en los grandes incendios forestales SECF-Unive, 2011.

Rogers, L. **Automating contour-based route projection for preliminary forest road designs using GIS**. 87 f., 2005. Master Thesis.University of Washington.

Rudel, T. K., Defries, R., Asner, G. P., Laurance, W. F. Changing drivers of deforestation and new opportunities for conservation. **Conservation Biology**, v.23, n.6, p.1396–1405, 2009. doi: 10.1111/j.1523-1739.2009.01332.x.

Sadek, S., Berdan, M., Kaysi, I. GIS platform multicriteria evaluation of route alignments. **Journal of Transportation Engineering**, v.125, n.2, p.144–151, 1999. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:2(144)

Sakai, H. Planning of long-term forest-road networks based on rational logging and transportation systems. **Bull Univ Tokyo For.**, v.76, p.1–85, 1987.

Şener, B. **Landfill Site Selection By Using Geographic Information Systems**, 132 f, 2004. MSc Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Ankara.

Sessions, J. Forest road operations in the tropics. Springer, XIII, 2007, 170p. doi: 10.1007/978-3-540-46393-1

Sessions, J., Wing, A., Coulter, E.D. Developing a decision support system to improve transportation. **Silva Fennica**, v.40, n.1, p.143–160, 2001.

Sist, P., Sheil, D., Kartawinata, K., Priyadi, H. Reduced-impact logging in Indonesian Borneo: Some results confirming the need for new silvicultural prescriptions. **For. Ecol. Manag.**, v.179, n.1-3, p.415–427, 2003. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00533-9

Spinelli, R., Marchi, E. **A literature review of the environmental impacts of forest road construction. In Seminar on environmentally sound forest roads and wood transport.** Sinaia (Romania): FAO: 1998, 423 p.

Stückelberger, J. A. GIS-gestützte Erschliessungsplanung. GIS-based road network planning. In: Bündnerwald. **Journal of Forest Service**, v. 3, p.19–24, 2006.

Tampekis, S., Sakellariou, S., Samara, F., Sfougaris, A., Jaeger, D., Christopoulou, O. Mapping the optimal forest road network based on the multicriteria evaluation technique: the case study of Mediterranean Island of Thassos in Greece. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.187, n.11, 2015. doi: 10.1007/s10661-015-4876-9.

Tan, J. Application of dynamic programming to optimum location of a forest road. **J For Eng**, v.11, p.33-42. 2000. doi: 10.1080/08435243.2000.10702752

Tan, J. Locating forest roads by a special and heuristic procedure, using GIS and linear programming. **ITC J.** v.2, p.172–177, 1999.

Tarolli, P., Calligaro, S., Cazorzi, F., Dalla Fontana, G. Recognition of surface flow processes influenced by roads and trails in mountain areas using high-resolution topography. **Eur J Remote Sens**, v.46, p. 176–197, 2013. doi: 10.5721/EuJRS20134610

Tavankar, F., Bonyad, A., Marchi, E., Venanzi, R., Picchio, R. Effect of logging wounds on diameter growth of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) trees following selection cutting in Caspian forests of Iran. **New Zeal. J. For. Sci.**, v.45, p. 1-7, 2015. doi: 10.1186/s40490-015-0052-9

Tavankar, F., Bonyad, A.E., Nikooy, M., Picchio, R., Venanzi, R., Calienno, L. Damages to soil and tree species by cable skidding in caspian forests of Iran. **For. Syst.**, v. 26, n.1, p. e009, 2017a. doi: 10.5424/fs/2017261-09100

Tavankar, F., Nikooy, M., Picchio, R., Bonyad, A., Venanzi, R. Effects of logging wounds on caucasian alder trees (*Alnus subcordata*, C.A. Mey.) in Iranian caspian forests. **Croat. J. For. Eng**, v.38, n.1, p.73–82, 2017b.

Tavankar, F., Nkkooy, M., Venanzi, R., Lo Monaco, A., Picchio, R. Study of forest road effect on tree community and stand structure in three Italian and 1 Iranian temperate forests. **Croat. J. For. Eng**, v.39, n.1, p. 17-21, 2018.

Thompson, M., Sessions, J., Boston, K., Skaugset, A., Tomberlin, D. Forest road erosion control using multiobjective optimization. **J Am Water Resour Assoc**, v.46, n.4, p.712–723, 2010. doi: 10.1111/j.1752-1688.2010.00443.x

Tian, J., Yan, Z. F. Fuzzy analytic hierarchy process for risk assessment to general assembling of satellite. **Journal of Applied Research and Technology**, v.11, n.4, p. 568–577, 2013. doi: 10.1016/S1665-6423(13)71564-5

Torre, M. La situación actual del problema de los incêndios forestales en España. **Cuadernos SECF**, v.31, p.179–195, 2009.

Turk, Y. Forest road design with cad software: a case study in the Western Black Sea region of Turkey. **Fresenius Environ. Bull.**, v.28, n.3, p.1743–1751, 2019.

Vaidya, O. S., Kumar, S. Analytic hierarchy process: an overview of applications. **European Journal of Operational Research**, v.169, n.1, p.1–29, 2006. doi: 10.1016/j.ejor.2004.04.028

Viegas, D.X. Fire Behavior and Fire Safety. *In* Atti del convegno. Gestione degli incendi boschivi tra innovazione e ricerca, Accademia dei Georgofili – Firenze – 2009.

Yoshida, M., Sakurai, R., Sakai, H. Forest road planning using precision geographic data under climate change. **International Journal of Forest Engineering**, p.1–9., 2018. doi:10.1080/14942119.2018.1498687.

Zadeh, L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v.8, p. 338–353, 1965.

Zhang, J., He, P., Xiao, J., Xu, F. Risk assessment model of expansive soil slope stability based on Fuzzy-AHP method and its engineering application. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v.9, n.1, p.389–402, 2018. doi: 10.1080/19475705.2018.1445664

## **CAPÍTULO 2: Análise de sensibilidade para avaliação do critério solo no planejamento de estradas florestais**

### **Resumo**

A partir de modelos de decisão baseados em avaliação multicriterial (MCA), os resultados geralmente estão associados a incertezas. A análise de sensibilidade pode quantificar esses efeitos, identificando como as mudanças nos mapas de entrada influenciam as saídas do modelo final. Mapas de solos e informações derivadas deles, como a erodibilidade do solo (fator K) utilizada neste estudo, são essenciais para a análise ambiental. No entanto, eles são comumente representados em classes, o que é um problema para modelos baseados em MCA. Neste contexto, o objetivo principal foi obter um mapa contínuo do fator K produzido por meio de lógica difusa e geoestatística, avaliando sua influência no mapa de saída gerado no contexto do modelo AMC. A análise de sensibilidade apoiou essa avaliação, comparando esse modelo, considerando o fator K espacializado com geoestatística (K2), com outro tendo o fator em classes (K1). É importante ressaltar que os modelos visam definir áreas críticas para alocação de estradas florestais, tendo como outros critérios a declividade, a distância do fluxo acumulado e o aspecto. O modelo K2 apresentou um valor de precisão superior ao K1, mostrando a representatividade prevista dos critérios no mapa final de 94,5%, enquanto o K1 apresentou 93,1%. Conclui-se que os métodos geoestatísticos e de lógica difusa suportam a produção de mapas de fator K, conforme exigido pelos métodos MCA, promovendo uma representatividade adequada das características do solo.

Palavras-chave: krigagem; análise ROC; avaliação multicriterial; lógica difusa; erodibilidade.

### **Abstract**

From decision models based on Multicriteria Evaluation (MCE), results are commonly associated with uncertainties. Sensitivity analysis can quantify these effects, identifying how input map changes influence the final mode outputs. Soil maps and information derived from them, such as soil erodibility (Factor K) used in this study, are essential for environmental analysis. However, they are commonly represented in classes, which is a problem for models based on MCE. In this context, our main objective was to obtain a continuous factor k map produced through fuzzy logic and geostatistics, evaluating its influence on the output map generated in the MCE model context. Sensibility analysis supported this evaluation since we compared this model, considering factor K spatialized with geostatistics (K2) with another

having factor in classes (K1). Important to say that models aimed to define critical areas for forest road allocation, having as other criteria the slope, distance to the flow accumulation water, and aspect. The K2 model showed a precision value superior to K1, showing the predicted representativeness of the criteria in the final map of 94.5%, while K1 presented 93.1%. We conclude that the geostatistical methods and fuzzy logic support the production of factor K maps, as MCE methods require, promoting an appropriate representativity of soil characteristics.

Keywords: kriging; ROC analysis; multicriteria evaluation; fuzzy logic; erodibility factor.

## 1. Introdução

No processo de tomada de decisão baseados na avaliação multicriterial (AMC), os resultados são, inevitavelmente, associados a uma variedade de incertezas, que podem ser identificadas e avaliadas por meio de uma análise de sensibilidade, a qual identifica os efeitos da incerteza em uma entrada do modelo ou grupo de entradas para a resposta do modelo (Nikishova et al., 2019).

Dessa maneira, os principais objetivos da Análise de Sensibilidade (AS) na modelagem ambiental incluem a (i) priorização de fatores para identificar as áreas mais sensíveis às variáveis, visando priorizar a coleta de dados adicionais (Liong et al., 2000; Ganji et al., 2001; Loucks et al., 2005); (ii) validação de modelo (Van Werkhoven et al., 2008; Ravalico et al., 2010; Rosero et al., 2010); e a (iii) fixação de fatores para determinar os insumos, que não fornecem nenhuma contribuição para a incerteza do produto (Pianosi e Wagener, 2015; Punzo et al., 2015).

Entre os autores que utilizaram a AS para avaliar a aplicação de modelos no planejamento ambiental podem ser citados, Crosetto et al. (2000); Chen et al. (2010); Ligmann-Zielinska (2013); Feizizadeh e Blaschke (2013); Feizizadeh et al. (2014); Vettorazzi e Valente (2016); Valente et al. (2017); e Opon e Henry (2020). Tais análises permitem que um nível de confiança seja determinado na saída do modelo, ajudando os tomadores de decisão a reconhecer e medir os intervalos de confiança nos resultados da modelagem (Chen et al., 2011). Além disso, podem indicar deficiências na metodologia utilizada no desenvolvimento do modelo e na sua aplicabilidade à diferentes cenários e escalas.

As fontes de variação, relacionadas à AMC, são aquelas referentes à alteração de critérios, bem como de relação de importância entre eles que, causam mudanças nos seus pesos de fator. Portanto, trata-se de uma análise importante no processo de tomada de decisão, pois é

preciso considerar as incertezas inerentes a construção de modelos. Essas incertezas podem ter impactos nos resultados, que às vezes podem levar a imprecisões de resultados e consequências indesejáveis (Feizizadeh e Blaschke, 2013; Feizizadeh et al., 2014). Portanto, de acordo com Chen et al. (2010) a análise de sensibilidade torna-se crucial para a validação e calibração da AMC.

Na AMC, quando se analisa mapas com objetivo de planejamento ambiental, um dos mapas mais utilizados é o de solos, considerado por autores como Mashalaba et al. (2020), como chave para orientar os tomadores de decisão na avaliação de recursos naturais, modelagem ambiental e estudos de uso e cobertura do solo.

Quando se pensa em estradas florestais, como em sua maioria não são pavimentadas, estas estão expostas ao aumento do escoamento superficial e à ocorrência de erosão do solo, tornando o mapa de solo um fator essencial para o planejamento ambiental. Por conseguinte, de acordo com Papierowska et al. (2020), estas estradas exigem constantemente reparos e manutenções, que estão associadas ao elevado custo das obras de terraplanagem. Embora a destruição da camada superficial da estrada, gerada pelo escoamento superficial, seja amplamente reconhecida nos solos de habitats florestais (Papierowska et al., 2020), há poucos estudos em relação aos solos que compõem as estradas florestais, o que demanda mais pesquisas.

A textura é uma das propriedades mais importantes do solo, que afeta processos físicos, químicos, biológicos e hidrológicos relacionados ao solo (Pan et al., 2010; Sun et al., 2014; Zhao et al., 2016; Ma et al., 2017; Poggio e Gimona, 2017; Li et al., 2020). A adequação das práticas de manejo da água e do solo também está intimamente relacionada à textura do solo (Thompson et al., 2012). As frações de tamanho de partícula do solo, ou seja, as composições percentuais de argila, silte e areia são amplamente usadas para classificar a textura do solo (Li et al., 2020), assim como para gerar a erodibilidade.

A erodibilidade, é o fator que indica a suscetibilidade do solo a respingos de gotas de chuva e o fluxo de água superficial. É um parâmetro essencial para a previsão da erosão do solo (Kulikov et al., 2017). Ela é exemplo de um parâmetro, calculado a partir de valores texturais, e está ligado às propriedades do solo, afetada pelo clima, topografia, tipo de uso e cobertura da terra e geomorfologia (Madenoglu et al., 2020).

A textura do solo geralmente exibe heterogeneidade espacial em diferentes escalas espaciais (Li et al., 2020), portanto, é essencial aplicar a interpolação espacial das frações granulométricas do solo, para gerar o mapeamento digital de forma coerente com a realidade. Considerando o levantamento por amostragem, o qual é o principal método para a obtenção da

distribuição da textura/frações de tamanho de partícula do solo em escalas regionais (Brus e Noij, 2008; Heim et al., 2009; Arrouays et al., 2012; Zhu et al., 2015), quando se necessita de inúmeras amostras, a amostragem torna-se dispendiosa.

Na AMC, quando se utiliza pontos amostrais para gerar mapas digitais de solo, estes mapas são gerados a partir da metodologia booleana, que de acordo com Eastman (2001), são combinados por operadores lógicos, como intersecção (AND) e união (OR). No entanto, desde os primeiros estudos de Burrough (1989), a teoria dos conjuntos difusos tem sido amplamente utilizada nas ciências do solo para avaliação de aptidão, classificação e índices de qualidade do solo. Ao usar os modelos de conjunto difuso, observações são agrupadas de forma contínua, em vez de classificação em classes (classificação booleana).

Porém, mesmo após a aplicação da lógica difusa, o qual é um método para agrupar dados multivariados em grupos (clusters), definindo a associação de um elemento pertencente a um conjunto de classes (Zadeh, 1965; McBratney e Odeh, 1997), pode ocorrer das classes se manterem evidentes, sem uma espacialização contínua como observado em trabalhos de Vettorazzi e Valente (2016) e Américo (2018), que utilizaram como critério o mapa de erodibilidade do solo. Este problema está ligado como o solo foi representado em classes, e a baixa densidade amostral, perdendo assim a variabilidade espacial, que pode ser amenizada a partir de métodos geoestatísticos no seu mapeamento digital.

A krigagem é uma das interpolações geoestatísticas mais utilizadas como métodos para interpolar a distribuição espacial de variáveis regionalizadas (frações de tamanho de partícula, minerais, nível do lençol freático etc.) com base nas observações pontuais. Esses métodos foram usados com sucesso para interpolar e prever as distribuições espaciais de fatores fisiográficos, armazenamento de água no solo, propriedades do solo etc. (Jost et al., 2005; Douaoui et al., 2006; Quijano et al., 2016; Song et al., 2016; Beguin et al., 2017; Chakraborty et al., 2017; Wang e Shi, 2018; Wadoux et al., 2018). Portanto, o método geoestatístico é uma ferramenta útil para analisar a estrutura de variabilidade espacial, interpolando as observações pontuais e criando o mapa de valores interpolados com um mapa de erro associado (Zhou et al., 2011; Arslan, 2012; Belkhiri et al., 2020).

Neste contexto, o objetivo foi obter um mapa representativo de solos produzido de forma contínua, por meio de lógica difusa e geoestatística e avaliar sua influência no mapa de saída, produzido por modelo de AMC.

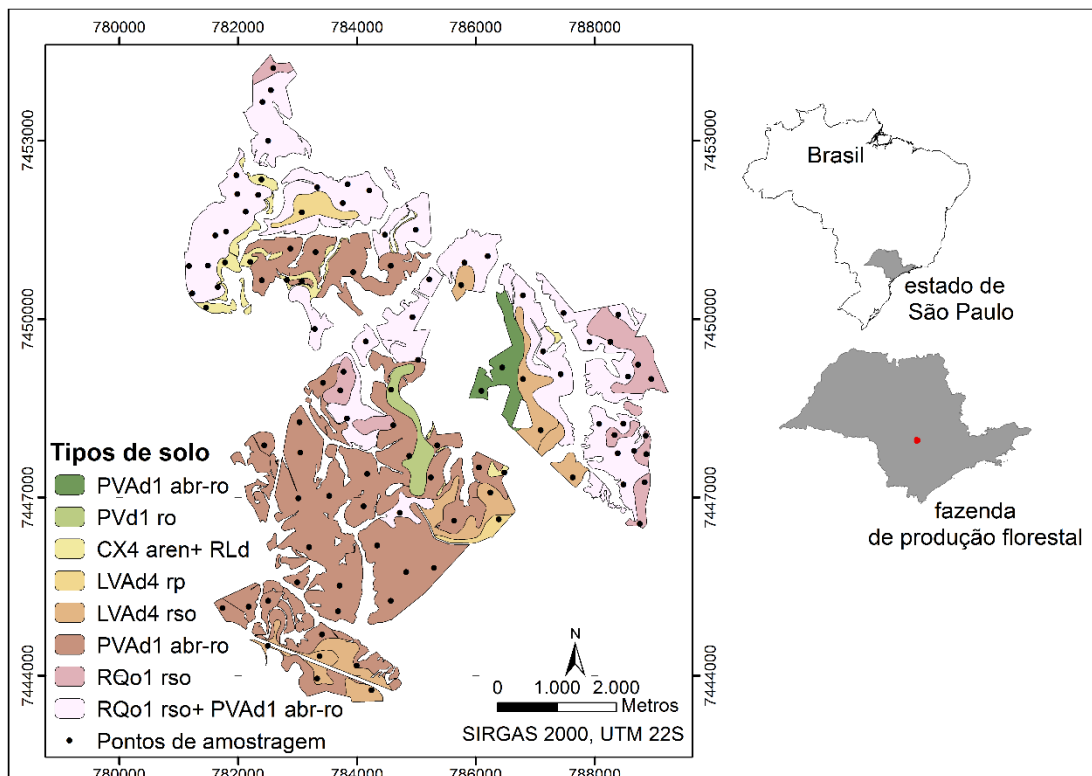
## 2. Material e métodos

### 2.1. Área de estudo

A área de estudo foi uma fazenda de produção florestal (Figura 1), localizada no estado de São Paulo, Brasil. A fazenda possui aproximadamente 3.900 hectares, ocupados predominantemente por plantios de eucalipto, destinados ao abastecimento da indústria de painéis de madeira.

Segundo o levantamento dos tipos de solo, realizado pela empresa proprietária da fazenda, sua área é ocupada em 47,47% pela Argissolo; 7,75% pela Latossolo; 7,24% pela Neossolo; e 37,54% é uma unidade heterogênea composta pela Cambissolo, Neossolo e Argissolo.

**Figura 1-** Localização, pontos de amostragem e tipos de solos para definição de áreas críticas à alocação de estradas florestais em fazenda de produção florestal, SP, Brasil.



Fonte: Autoria própria

Sendo: CX<sub>4</sub> aren + RL<sub>d</sub> - Cambissolo + Neossolo Litólico Distrófico; LV<sub>Ad4</sub> rp- Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico; LV<sub>Ad4</sub> rso-Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico; PVA<sub>d1</sub> abr-ro- Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; PV<sub>d1</sub> ro- Argissolo Vermelho Distrófico típico; RQ<sub>o1</sub> rso- Neossolo Quartzarênico Órtico típico; RQ<sub>o1</sub> rso + PVA<sub>d1</sub> abr-ro- Neossolo Quartzarênico Órtico típico + Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

Classificação de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (Santos et al., 2018).

## 2.2. Modelo conceitual de apoio à tomada de decisão

O modelo conceitual de apoio à tomada de decisão incluiu a definição, identificação da importância, normalização e agregação de critérios.

Gerou-se dois modelos baseados em critérios representativos de características do solo, relevo e hidrografia da fazenda, os quais foram definidos por Técnica Participatória no trabalho de Américo (2018), sendo eles declividade, distância do fluxo de água acumulado, aspecto e erodibilidade do solo (fator K).

Assim, nos dois modelos, as características de solos foram representadas pelo critério fator K, que é um dos componentes da equação universal de perdas de solo (USLE, do inglês *Universal Soil Loss Equation*).

A principal diferença entre esses modelos foi a forma de produção do mapa representativo de solos, em que o primeiro modelo manteve a espacialização em classes (método booleano), as quais foram eliminadas no segundo, com o método geoestatístico e lógica difusa.

Neste contexto, comparou-se o planejamento de estradas suportado por dois modelos de apoio à tomada de decisão, de uma fazenda florestal produtora de madeira (Figura 1), em níveis de criticidade à alocação de suas estradas florestais, por meio da Análise de Sensibilidade (AS).

A AS permitiu entender a diferença que se tem na espacialização de níveis de criticidade à alocação de estradas florestais tendo como entrada mapas de solo em classes (K1) e outro produzido no contexto geoestatístico (K2).

## 2.3. Mapeamento de solos

Os mapas de fator K basearam-se em dados de solos coletados por Américo (2018) na fazenda de produção florestal. A coleta totalizou 105 pontos amostrais (Figura 1), cujas posições geográficas foram registradas a partir de um receptor GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite, do inglês *Global Navigation Satellite System*), com precisão nominal de 3,65 metros.

Elas foram realizadas na profundidade de 20 a 40 cm, por corresponderem ao horizonte B de todos os tipos de solos. As amostras de solo coletadas foram analisadas em laboratório

para determinar as frações granulométricas, que considerou os tamanhos das partículas menor de 0,002 mm para argila; de 0,002 - 0,053-mm para silte e de 0,053-2,00 mm para areia total, a partir do método da pepita.

### 2.3.1. Fator K suportado pelo método booleano

O mapa de fator K, no estudo de Américo (2018), foi elaborado a partir da associação booleana dentro do ambiente SIG, entre o mapa digital de classificação do tipo de solo com os valores de erodibilidade dos dados texturais obtidos em campo (Tabela 1).

**Tabela 1-** Valores do fator K (erodibilidade) na profundidade 20 a 40 cm, para indicação de áreas críticas à alocação de estradas florestais em uma fazenda de produção florestal, SP, Brasil

Classes de solo	Valores de erodibilidade (t.ha.h.ha-1.MJ-1. mm-1)
	20-40cm
LVAd4 rp	0,0654
LVAd4 rso	0,0724
PVd1 ro	0,0509
PVAd1 abr-ro	0,1348
CX4 aren + Rld	0,0475
RQo1rso	0,0772
RQo1 + PVAd1 abr-ro	0,1137

Fonte: Autoria própria

### 2.3.2. Fator K suportado pelo método geoestatístico

Os mesmos dados texturais coletados em campo (Tabela 1), foram utilizados para realizar a krigagem ordinária e a análise de sensibilidade com o mapa final.

A krigagem é uma abordagem geoestatística típica que se baseia em valores observados e suas posições espaciais correspondentes para estimar valores em locais não amostrados (Li et al., 2020). Em outras palavras, é uma técnica de interpolação, na qual a variabilidade espacial pode ser representada por mapas de isolinhas e mapas de superfície que são elaborados a partir de estimativas da variável em locais não medidos.

A krigagem pode auxiliar na confecção de um mapa com uma espacialização contínua dos limites da classe do polígono, não deixando que predomine no mapa final do modelo de decisão. Neste estudo, os métodos de krigagem foram implementados usando o *software* R-

Core Team, com o pacote geoestatístico "gstat", e os pacotes de manipulação de dados espaciais "raster", "sp" e "maptools" (Pebesma, 2004; Pebesma e Bivand, 2005; Lewin-koh e Bivand, 2012; Hijmans e Etten, 2015).

Os semivariogramas experimentais dos dados originais e valores transformados foram estimados antes da aplicação de métodos de krigagem para interpolação. As funções de semivariograma são frequentemente descritas pelo modelo exponencial, esférico, gaussiano ou linear (Li et al., 2020). Além disto, existem três parâmetros principais do semivariograma, incluindo pepita, patamar (sill total) e alcance.

A pepita representa os erros de medição inexplicáveis de curta distância ou variação espacial aleatória. O patamar é o valor da semivariância no qual o semivariograma se aproxima da constante e representa a variância das variáveis. Enquanto o alcance é a distância na qual o semivariograma atinge o patamar e além da qual a variável não está mais correlacionada (Li et al., 2020). A análise de semivariograma é geralmente usada para determinar a variabilidade espacial. A dependência espacial da variável pode ser avaliada estimando a proporção da pepita, ou seja, a proporção da pepita para o patamar total (Matheron, 1963).

O ajuste de modelos matemáticos em semivariogramas é um procedimento subjetivo. No entanto, a qualidade do ajuste pode ser verificada por meio da técnica de validação cruzada, que foi utilizada para decidir o melhor modelo e seus coeficientes. Esta é uma técnica de interpolação não tendenciosa, que possui variância mínima, e cada estimativa é obtida calculando uma média ponderada de um conjunto de observações ao redor de uma vizinhança. Ou seja, assume-se que um elemento da amostra não foi observado, e para isso, o valor amostrado é retirado e a estimativa é obtida por krigagem, utilizando-se os valores dos pontos vizinhos, conforme citado por Andriotti (2002). Este processo é realizado para todos os pontos amostrados e ao final de cada ponto haverá o valor verdadeiro e o valor estimado, ou seja, o erro estimado.

#### **2.4. Áreas críticas para alocação de estradas florestais**

A espacialização da criticidade das estradas florestais considerou os critérios declividade, distância do fluxo de água acumulado, aspecto e erodibilidade (fator K), os quais foram agregados pelo método da Combinação Linear Ponderada (CLP) de AMC.

No entanto produziu-se dois modelos de espacialização, distintos entre si pela forma de produção do fator k, com o primeiro espacializado por método booleano (K1) (Américo, 2018) e no outro suportado por método geoestatístico (K2).

Destaca-se que Américo (2018) desenvolveu o primeiro modelo, cumprindo as etapas requeridas por métodos de AMC, as quais foram replicadas neste estudo, considerando o novo mapa de fator K. Etapas que consideraram a geração dos planos de informação básicos; criação de mapas de critérios, definição de seus pesos de fator, identificação da influência dos critérios, e por fim sua agregação para produzir o mapa final, nesse estudo de áreas críticas à alocação de estradas. Assim, iniciou-se gerando os planos de informação com resolução espacial de 5 (cinco) metros, que é a mesma dos mapas de critérios e áreas críticas deste estudo.

## 2.5. Importância dos critérios

No âmbito da AMC primeiro necessita-se da definição dos critérios e da importância relativa entre eles, a qual é comumente definida com a consulta a especialistas, conhecida também como Técnica Participatória, assim como em estudos de Eastman (2012), Boroushaki e Malczewski (2010), Malczewski e Rinner (2015) e Valente et al. (2021).

Américo (2018) consultou especialistas, profissionais e tomadores de decisão que atuam na área do projeto, seguindo o indicado por Saaty (1980) aplicou o método da comparação pareada, no contexto do processo hierárquico analítico. Os pesos de fator obtidos foram de 31,20% para declividade, 28,04% para fator K, 28,04% para distância do fluxo acumulado de água, e 12,71% para aspecto.

Esses critérios foram normalizados para uma escala comum variando de 0 a 255 bytes, associando valores mais altos às áreas mais críticas, baseando-se na lógica difusa por meio de equações que representavam seus respectivos comportamentos (i.e., equações lineares crescente, decrescente e simétrica) (Equação. 1).

$$x_i = \frac{R_i - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \times m \quad (1)$$

Sendo: R = pontuação original; m= a escala normalizada (0 a 255 bytes).

Entretanto, considerando suas características intrínsecas, a lógica difusa não minimizou os limites de classe do mapa de solo do primeiro modelo (K1), resultando em classes associadas a um único valor da escala 0-255 bytes e, assim, mantendo a espacialização em categorias. Para os demais critérios, do primeiro modelo, não se observou esse comportamento, considerando que naturalmente já apresentavam seus dados espacializados continuamente.

Já para o segundo modelo (K2), manteve-se os mesmos critérios aspecto, declividade e distância ao fluxo acumulado de água, variando somente o método de elaboração do fator K como descrito no item 2.3.2.

## 2.6. Influência dos critérios

Definir a influência dos critérios auxilia o entendimento de suas características intrínsecas e colabora para definição de seus pesos de fator.

Respeitando-se a hierarquização de importância dos critérios, pode-se ajustar pesos de fator de modo que critérios cujas feições estejam distribuídos pela paisagem não sejam dominantes na espacialização dos mapas finais de áreas críticas ou prioritárias. Assim, definir a influência de um critério, suportará seu controle por meio dos pesos de fator, os quais podem ter seus valores elevados ou reduzidos, desde que se respeite a ordem de importância definida para eles previamente.

Valente e Vettorazzi (2008) e Malczewski e Rinner (2015) propuseram definir a influência da mesma forma que se faz em outros métodos de AMC. Assim, associa-se peso máximo (1 ou 100%), a cada um deles, ou seja, é atribuído o valor um (po) à posição de critério um e, concomitantemente, o valor zero para as outras posições (dois a quatro). A semelhança do mapa gerado com um dos critérios é o indicativo daquele com menor influência. Posteriormente, o valor máximo po é associado às demais posições, e a posição quatro (4) indica o critério de maior influência.

Este procedimento foi realizado para os mapas finais, modelos K1 e K2, respectivamente.

## 2.7. Agregação dos critérios

Por fim, agregou-se os critérios do modelo K1, em que se tinha fator K elaborado pelo método booleano, e do modelo K2, com fator K elaborado pelo método da krigagem, para a produção dos mapas de áreas críticas. Nessa agregação utilizou-se método da Combinação Linear Ponderada (CLP) (Equação 2) de AMC.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i X_i * \prod_{j=1}^K c_j \quad (2)$$

Sendo:  $S$  = valor final da pontuação;  $w_i$  = peso do parâmetro do fator  $i$  (com  $i = 1, \dots, n$ );  $n$  = número de critérios;  $x_j$  = valor normalizado para o mesmo fator;  $c_j$  = pontuação (0 ou 255) do parâmetro de exclusão (com  $j = 1, \dots, k$ ); e  $k$ : número de parâmetros de exclusão.

Avaliou-se os histograma dos modelos finais, como proposto por Vettorazzi e Valente (2016), com homogeneidade de frequência de distribuição de pixels, sendo reclassificados em sete classes com o mesmo intervalo de valores para os dois modelos (K1 e K2).

Ressalta-se que Américo (2018), mesmo utilizando o fator K gerado por método booleano, obteve precisão estatisticamente significativa do mapeamento de áreas críticas para alocação de estradas florestas, indicando que os critérios representavam em seu modelo as características da paisagem.

## 2.8. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade (AS) é uma ferramenta que auxilia na compreensão de variáveis previamente definidas pelos tomadores de decisão, ou seja, avalia o grau de importância de um critério e sua influência no poder de decisão, de acordo com Valente e Vettorazzi (2008). Esta análise visa dar robustez a AMC, uma vez que testa a veracidade do peso do fator avaliando também diferentes alternativas (Malczewski, 2010).

Neste estudo, a AS permitiu a comparação dos dois modelos, ou seja, a espacialização de áreas críticas, tendo mapas de fator K gerados de formas distintas, indicando qual modelo suportou os melhores resultados no contexto da AMC, seja aquele gerado com o mapa de solo no contexto de lógica difusa com métodos geoestatísticos ou booleanos.

Neste estudo, a AS foi realizada no *software* R-Core Team, para definição do melhor cenário considerando os dois métodos de mapeamento do critério de solos. A AUC foi comparada para determinar o desempenho com a mudança do critério de solo. A amostragem se deu de forma aleatória estratificada, definida por uma amostragem casual simples, como proposto por Eastman (2001), totalizando 73 pontos, os quais estavam localizados nas estradas florestais da fazenda e serviram de base para verificação de campo no trabalho anterior de Américo (2018).

Para avaliar a AS, utilizou-se a análise ROC (Característica de Operação do Receptor, do inglês *Receiver Operating Characteristic*), sendo um método gráfico para avaliação, organização e seleção de sistemas de diagnóstico e/ou previsão (Prati et al., 2008). É comumente utilizado em pesquisas médicas, mas tem sido empregado para validar mapas

gerados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), como os gerados nos trabalhos de Pradhan (2009); Manap et al. (2014); Nampak et al. (2014); Park et al. (2014); Xiong e Zuo (2017) e Rahmati et al. (2018).

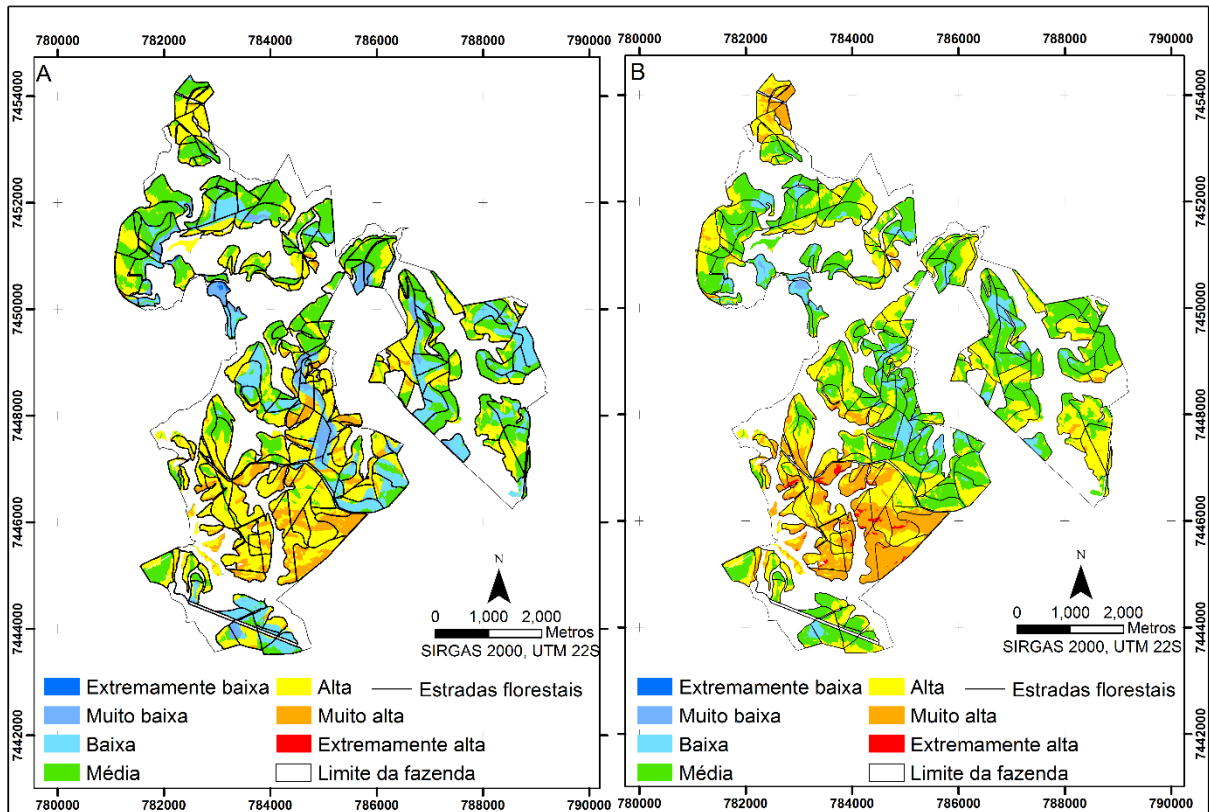
A análise baseia-se na medição da sensibilidade, a taxa de verdadeiros positivos (ausência de erro de omissão) em relação ao complemento de especificidade (1 menos especificidade) sendo a taxa de falsos positivos (Pradhan e Lee, 2010). A área sob a função ROC, também chamada de área sob a curva (AUC, do inglês *Area Under Curve*) é uma medida eficaz da combinação de sensibilidade e especificidade que descreve a validade inerente de testes diagnósticos (Kumar e Indrayan, 2011) e permite a comparação de dois ou mais modelos de predição, sendo um de seus maiores benefícios. Em outras palavras, a AUC é uma medida da capacidade discriminativa de um método, ou seja, a capacidade de um método ter sido classificado corretamente.

A AUC mede o desempenho geral dos modelos preditivos (Pereira et al. 2012; Choubin et al., 2018). O valor de AUC mais próximo de 1 indica o melhor desempenho na previsão do ranking de criticidade de estradas florestais. Uma classificação detalhada da AUC foi apresentada por Yesilnacar (2005) da seguinte forma: baixa precisão (50 - 60%), moderada precisão (60 - 70%), boa precisão (70 - 80%), muito boa precisão (80 - 90%), e excelente precisão (90 - 100%).

### **3. Resultados**

Para a fazenda florestal, o mapa de criticidade das estradas florestais (Figura 2), representa a combinação dos critérios de erodibilidade (fator K), declividade, distância do fluxo acumulado de água e do aspecto, a partir do método da CLP. Na Figura 2A, com o critério fator K gerado sem uma espacialização contínua (modelo K1), o mapa final indicou que 0,06% da fazenda obteve uma criticidade extremamente alta; 10,90% muito alta; 39,46% alta; 29,68% média; 15,61% baixa; 4,14% muito baixa e 0,14% extremamente baixa. Com o critério fator K gerado por meio da krigagem (modelo K2), o mapa indicou que 0,74% da fazenda foi classificada com criticidade extremamente alta; 14,60% muito alta; 35,96% alta; 41,71% média; 6,68% baixa; 0,30% muito baixa, e 0,005% extremamente baixa.

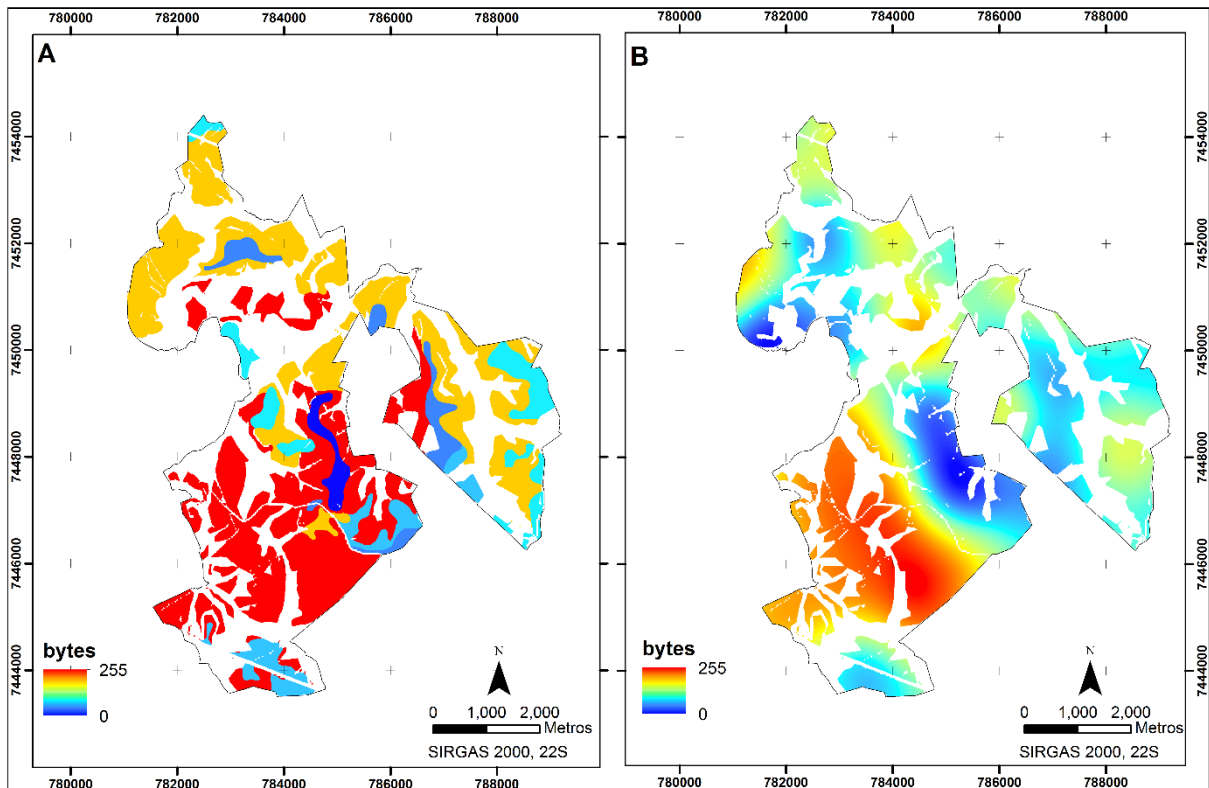
**Figura 2-** Áreas à alocação de estradas florestais, em níveis de criticidade, com o critério erodibilidade, em uma fazenda de produção florestal, SP, Brasil. Sendo: A: K1- mapa sem krigagem e B: K2- mapa com krigagem.



Fonte: Autoria própria

Observa-se abaixo os dois mapas de fator K normalizados na escala de 0-255 bytes, sendo a Figura 3A gerada anteriormente por Américo (2018) a partir da associação booleana, onde é possível observar evidentes as classes de erodibilidade, o que é muito próximo se comparado ao mapa do solo da fazenda (Figura 1). Já na Figura 3B (K2), é possível observar a espacialização dos dados de forma contínua, principalmente se observado quando se passa de uma classe de solos para outra (Figura 1).

**Figura 3-** Critério erodibilidade normalizado: A: K1 e B- K2, para indicação de áreas críticas à alocação de estradas florestais em uma fazenda de produção florestal, SP, Brasil.

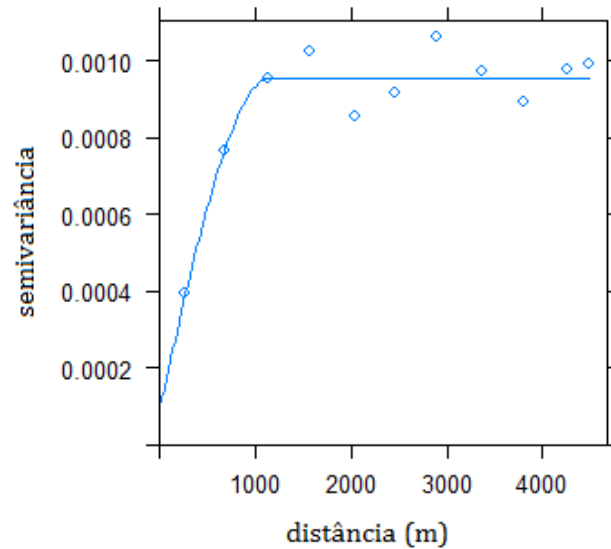


Fonte: Autoria própria

Para gerar o mapa de fator K a partir do método geoestatístico (K2), observa-se que os valores médios encontrados para a profundidade não são próximos, indicando variabilidade espacial. A partir dos ajustes dos modelos aos semivariogramas pela técnica de krigagem ordinária e análise geoestatística, o modelo escolhido foi o modelo exponencial por apresentar o menor erro quadrado médio (0,204) e maior coeficiente de determinação (0,869), além do melhor ajuste para o modelo. A Figura 4 representa o semivariograma experimental para a profundidade do solo estudada, ajustado pelo modelo exponencial, o qual melhor representou a variação dos valores de K na fazenda de produção florestal.

O alcance do semivariograma foi de 1.100 metros, ou seja, dentro de um círculo com esse raio, os pontos foram correlacionados espacialmente, sendo considerados 16 vizinhos para cada amostra de solo. Quando verificada a dependência espacial por meio do ajuste do semivariograma, obtiveram-se os parâmetros efeito pepita ( $C_0$ ), patamar (C) e alcance (A), utilizados na krigagem, iguais a 0,0004; 0,0005 e 1100; respectivamente. Esses valores, quando analisados no semivariograma, indicam o ponto em que a curva se estabiliza, ou seja, além desses valores, ela passa a não ter mais correlação e não será considerada na previsão.

**Figura 4-** Semiovariograma ajustado para o modelo exponencial para o mapa de indicação de áreas críticas à alocação de estradas florestais em uma fazenda de produção florestal, SP, Brasil

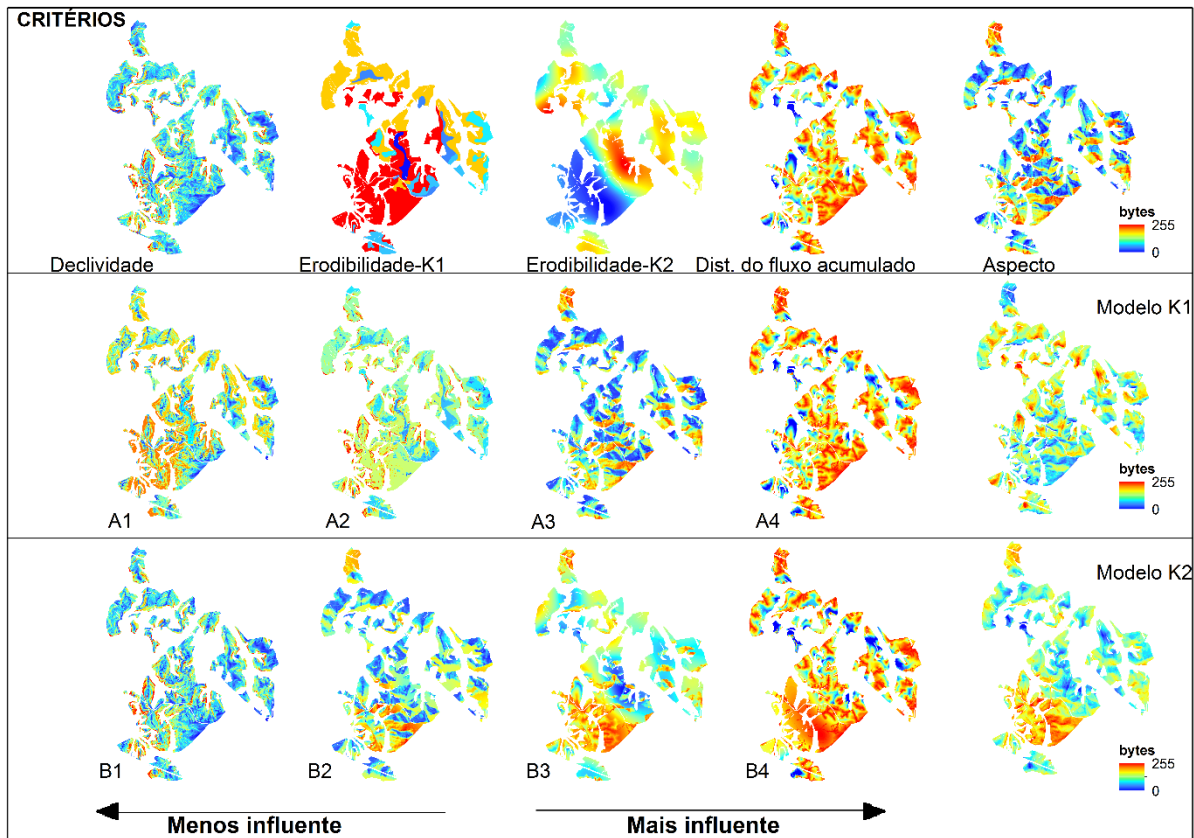


Fonte: Autoria própria

A partir da validação cruzada, se obteve valores de erro quadrado médio igual a 0,423 e coeficiente de determinação igual a 0,889; indicando que o método de interpolação de dados por krigagem pode ser utilizado.

A partir da análise de influência dos critérios no mapa final (Figura 5), observou-se os critérios de entrada, sendo que em cada mapa final de AMC, apenas o critério fator K (K1 e K2) teve variações. É possível observar o modelo K1, o qual foi elaborado com o fator K1, que a influência variou do menor para a maior, sendo declividade (A1), erodibilidade (K1) (A2), aspecto (A3) e distância ao fluxo de água acumulado (A4). Pode-se ainda observar que para o modelo K2 elaborado com o critério K2, a influência do menor para o maior foi: declividade (B1), aspecto (B2), erodibilidade (K2) (B3) e distância ao fluxo acumulado de água (B4).

**Figura 5-** Critérios de entrada e sua influência nos modelos K1 e K2 para indicação de áreas críticas à alocação de estradas florestais em uma fazenda de produção florestal, SP, Brasil.

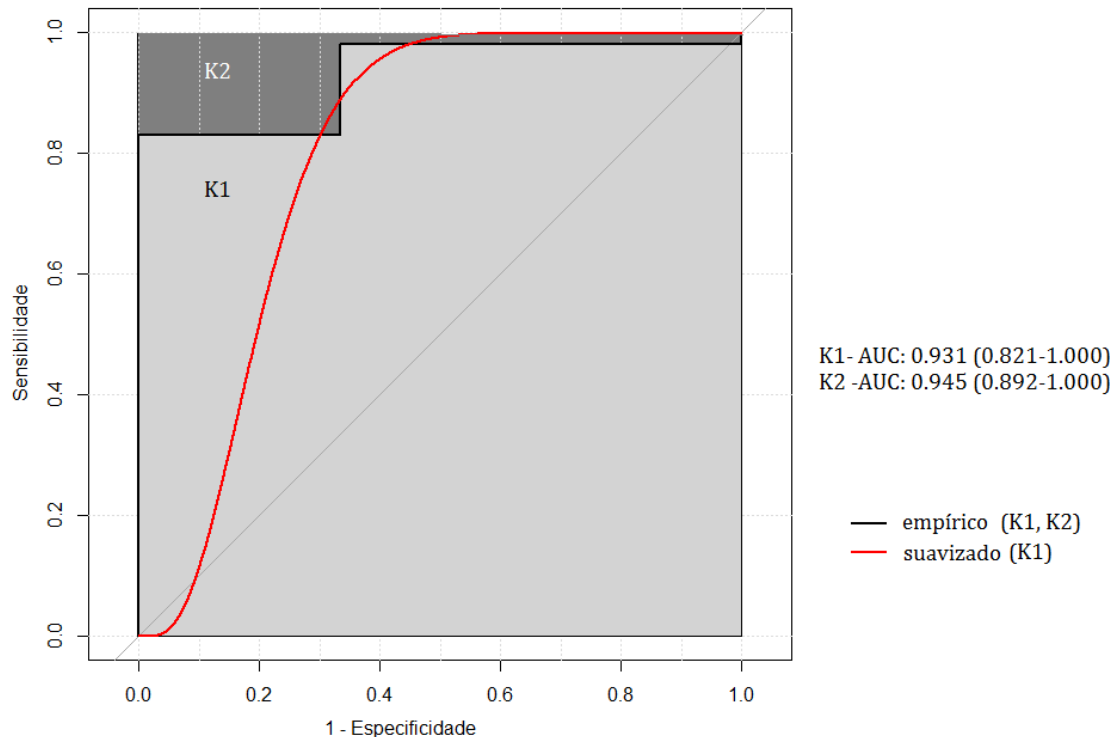


Fonte: Autoria própria

Para a análise de sensibilidade por meio da avaliação ROC, se obteve a curva AUC produzida para os modelos finais (Figura 6). A AUC mostra o desempenho de previsão de um modelo, mostrando a capacidade do modelo de simular a entrada dos diferentes mapas de erodibilidade nos resultados finais (modelos K1 e K2).

No modelo K1, a curva AUC foi igual a 0,931, com intervalo de confiança variando de 0,821 a 1. Isso significa que o mapa das áreas críticas geradas pelo método AMC apresentou um limiar de 17,9% e uma precisão de 93,1% na previsão da representatividade dos critérios no mapa final de áreas críticas. No modelo K2, com a agregação dos critérios de solo com o método de krigagem, a AUC foi igual a 0,945; com intervalo de confiança variando de 0,892 a 1. Ou seja, apresentou um limiar de 10,8% na previsão da representatividade dos critérios no mapa final, com acurácia de 94,5%.

**Figura 6-** Área sob a curva do método CLP, em uma fazenda de produção florestal, SP, Brasil. Sendo: K1- mapa sem krigagem e K2- mapa com krigagem.



Fonte: Autoria própria

O valor de acurácia para as duas agregações foi estatisticamente significativo, rejeitando a hipótese nula de uma AUC de 0,50; o que indicaria que os critérios não estavam sendo representados no mapa final.

#### 4. Discussão

A partir do mapa de criticidade (Figura 2), com o critério fator K1 e K2, observou-se que as classes, extremamente alta, muito alta e média tiveram um aumento em suas áreas, e as classes alta, baixa, muito baixa e extremamente baixa uma diminuição no tamanho de suas áreas. Esta variação está ligada à espacialização do critério de erodibilidade após a krigagem, enquanto na Figura 2A a distribuição espacial do fator K foi conforme as classes de solo, considerando um único valor para todo o polígono. Após a krigagem (Figura 2B) os valores de erodibilidade perto dos limites de cada polígono, passaram a ser espacializados continuamente.

Com a aplicação da lógica difusa (Figura 3), observou-se que o mapa interpolado da krigagem (Figura 3B) teve uma tendência geral, com menores valores de fator K principalmente nas partes leste, sul e sudeste, e maior predominância na área central, oeste e sudoeste. Assim, a parte central da fazenda onde antes havia altos valores (Figura 3A), após a interpolação, a

escala de distribuição principalmente perto das bordas de transição dos tipos de solo se dissolveu, melhor espacializando de fator K.

O comportamento observado na Figura 3A é explicado devido à distribuição espacial que se deu conforme as classes de solo, uma vez que foram reclassificadas para valores K e normalizadas, ou seja, um único valor (escala 0-255 bytes) foi considerado para todo o polígono referente ao tipo de solo, e na Figura 3B a normalização após a krigagem eliminou a diferença de classes de solo.

O mapa fator K2 elaborado a partir das técnicas geoestatísticas, permitiu gerar um modelo de dependência espacial das variáveis do solo, o que gerou a estimativa em pontos não amostrados, possibilitando o mapeamento e zoneamento da variável, o que fez com que este procedimento aumentasse a precisão do modelo K2, em comparação com o primeiro resultado obtido por Américo (2018).

Os parâmetros estatísticos ajudaram a escolher o modelo de semivariograma mais adequado para criar o mapa de predição K2. A análise do erro quadrático médio da raiz, que foi um valor baixo, e o coeficiente de determinação, que ficou próximo de um (1), indicou que os dados de textura do solo deste estudo podem ser interpolados usando a técnica geoestatística de krigagem.

O erro médio próximo a zero e o coeficiente de determinação de validação cruzada traz a confirmação quanto à correta interpolação da erodibilidade. Tais valores são esperados uma vez que as estimativas de krigagem são imparciais, mesmo se com modelos mal escolhidos (Oliver e Webster, 2014; Avalos et al., 2018). De acordo com Khanchoul e Boubehziz et al. (2019), as ferramentas SIG utilizadas em conjunto com os modelos geoestatísticos favorecem a modelagem realista, uma vez que o erro relacionado ao processo é atribuído.

Com a análise do semivariograma (Figura 4), foi possível mensurar o grau de dissimilaridade entre amostras vizinhas, pois se espera que quanto mais próximas essas amostras forem coletadas, maior será a similaridade entre elas, menor a variância, e maior a correlação espacial, porém quanto mais distante, menor a similaridade, até que essas diferenças sejam atribuídas apenas ao acaso. O alcance obtido neste estudo foi de 1.100 metros, e que, conforme destacado por Almeida et al. (2017), torna-se importante para o planejamento e avaliação experimental, pois pode auxiliar na definição de procedimentos de amostragem subsequentes.

As variações observadas entre os dois modelos (Figura 2) são melhores explicadas pela análise de influência (Figura 5), onde o primeiro modelo K1 com o critério fator K1 gerado com a metodologia booleana, ocupa a terceira posição do critério de maior influência no mapa

final. Já a partir da técnica geoestatística (modelo K2), onde sua espacialização foi mantida após a aplicação da lógica difusa, o critério fator K passou da terceira posição para a segunda mais influente. Como seu peso de fator é o segundo maior (28,04%), isso influenciou as mudanças nas áreas de cada classe. Ressalta-se que nenhum dos quatro critérios predominaram no mapa final.

Embora uma das características comumente associadas ao método AMC com o método CLP, é que ele depende dos valores associados aos pesos dos fatores e da influência dos critérios, o que conseqüentemente produz um mapa final com as características predominantes do mais influente (Malczewski, 2003; Valente e Vettorazzi, 2008; Ferretti e Pomarico, 2013; Vettorazzi e Valente, 2016), isso não ocorreu neste estudo, como pode ser observado na Figura 5.

Um aspecto que influenciou, não apenas nesse critério, como os outros que não predominaram nos modelos finais, foi o detalhamento do banco cartográfico, conseqüente o detalhamento dos critérios, o que influenciou positivamente a aplicação da CLP.

O mesmo ocorreu com Valente et al. (2017) e Silva et al. (2017), que utilizaram a resolução espacial de cinco metros, com conseqüente detalhamento do critério. Assim, com o detalhamento do banco de dados, pode-se ter uma melhor espacialização, mesmo usando o tradicional método de média, a CLP.

Ainda, os critérios agregados junto ao mapa de solo são inter-relacionados. Por exemplo, a declividade, que é capaz de identificar os terrenos mais íngremes, que com a presença de solos instáveis, estarão mais propensos a deslizamentos e perda de solo, conforme relatado por Eker e Aydin (2014). Assim, como também influencia os processos erosivos, principalmente a erosão hídrica do solo, pois seu aumento promove o aumento do volume e da velocidade de escoamento e diminui a infiltração de água no solo.

O fluxo de água acumulado, a velocidade e o volume de água estão diretamente relacionados ao seu trajeto, onde um aumento de energia no processo resulta em aumento da erosão e movimentação de sedimentos na paisagem, segundo Parsakhoo et al. (2016).

A umidade do solo, aqui representada pelo critério aspecto, também está associada ao critério de solo, pois é importante manter o solo com drenagem eficiente, evitando assim o acúmulo de água, conseqüentemente com menor umidade.

Tais critérios, combinados a partir do método AMC, conseguiram elucidar os efeitos críticos que podem gerar nos solos, indicando a criticidade das estradas florestais, o que foi explicado com a mudança do critério solo no processo de decisão, demonstrando que ao

melhorar sua espacialização houve também um ganho na confiabilidade do mapa final validado em campo.

A análise estatística ROC (Figura 6), contribuiu para elucidar a melhor metodologia aqui empregada, indicando a melhora na confiabilidade do mapa, a partir da precisão dos mapas finais, passando de 93,1% (modelo K1) para 94,5% (modelo K2) com a alteração do critério erodibilidade. Segundo Berrar e Flach (2011), um bom classificador deve ter uma AUC próxima a um, o que indica um resultado estatisticamente significativo para a metodologia empregada, na qual os critérios estão sendo representados no mapa final.

Os resultados indicaram, para ambos os casos, uma excelente acurácia no desempenho dos mapeamentos, conforme classificação de Yesilnacar (2005), indicando ganho no mapa final que considerou métodos geoestatísticos para a produção do mapa de erodibilidade, melhorando sua espacialização após a aplicação da lógica difusa.

Os resultados ainda mostraram que o intervalo de confiança do modelo K2 foi menor que o intervalo de confiança do modelo K1, sendo mais um indicativo do aumento da confiabilidade em relação ao mapa final, já que um intervalo de confiança é um intervalo baseado na distribuição de probabilidade do estimador, que expressa a confiança, ou probabilidade, de que o intervalo contenha o parâmetro que está sendo estimado, segundo Riffenburgh e Gillen (2020).

De acordo com Zhang et al. (2020), durante a última década, com o desenvolvimento de métodos computacionais e avanços técnicos, o mapeamento digital de solos tem sido cada vez mais explorado pelo seu potencial na determinação da variabilidade horizontal e vertical das propriedades do solo. Informações sobre a variabilidade das propriedades do solo podem auxiliar na melhor distribuição de parcelas e experimentos de campo, bem como no manejo mais racional da água, do solo e do uso de fertilizantes e defensivos em áreas florestais e agrícolas.

A partir da avaliação das estradas atualmente existentes na área de estudo já avaliadas no próprio local por Américo (2018), com os mapas de critérios e o mapa final, já havia sido observada a correspondência entre os valores dos pesos associados aos critérios, gerando assim um mapa adequado a partir do processo decisório. Com o uso da krigagem no mapa de solo, evidenciado a partir da análise estatística, se obteve melhora na correspondência entre os critérios e o mapa final.

## 5. Conclusão

O critério solo é um mapa essencial para o planejamento ambiental, e quando espacializado de forma contínua, por meio de métodos geoestatísticos traz melhorias para o mapa final quando agregado aos demais critérios considerados importantes para representar estradas florestais.

O método da Combinação Linear Ponderada da AMC permite a definição de áreas críticas para alocação de estradas florestais, com base nos critérios selecionados, sendo de fácil elaboração e representam as características críticas para estradas florestais.

A partir da análise de sensibilidade, realizada por meio da análise estatística ROC, é possível verificar a acurácia do mapa final, com assertividade estatisticamente significativa, demonstrando melhora do mapa elaborado a partir de técnicas de geoestatística em relação ao mapa elaborado a partir da técnica booleana, aumentando a representatividade dos critérios no mapa final. Esses números ainda validam a contribuição dos critérios para a produção do mapeamento, considerando sua importância relativa e respectivas influências no processo decisório.

Pode-se concluir, ainda, que o uso de métodos geoestatísticos, como a krigagem, vem sendo aprimorado e implementado no ambiente SIG e podem ser aplicados para melhorar a análise de modelos ambientais a partir de métodos AMC. Assim como a análise de sensibilidade, que permite identificar os efeitos da alteração dos mapas de entradas na resposta final dos modelos.

## Referências

- Almeida, L. S., Guimarães, E. C. Geostatistics for determining and modeling the spatial variability of micronutrients in soil cultivated with coffee in the municipality of Araguari-MG. **Agronomic Culture: Journal of Agronomic Sciences**, vol. 26, n. 2, p. 158-173, 2017. doi: 10.32929/2446-8355.2017v26n2p158-173
- Américo, C. **Microplanning of forest roads through geotechnologies**, 48f, 2018. (Master's Dissertation). Federal University of São Carlos, Sorocaba campus.
- Andriotti, J.L.S. Geostatistics notes. **Acta Geologica Leopodensia**; v. 24, n.55, p. 3-14, 2002.
- Arrouays, D., Marchant, B.P., Saby, N.P.A., Meersmans, T.G., Oron, T.G., Martin, M.P., Bellamy, P.H., Lark, R.M., Kibblewhite, M. Generic issues on broad-scale soil monitoring

schemes: A Review. **Pedosphere**. v.22, n.4, p. 456–469, 2012. doi: 10.1016/s1002-0160(12)60031-9

Arslan, H. Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: the case of Bafra Plain. Turkey. **Agric. Water Manag**, v. 113, p. 57–63, 2012, doi:10.1016/j.agwat.2012.06.015

Avalos, F. A. P., Silva, M. L. N., Batista, P. V. G., Pontes, L. M., de Oliveira, M. S. Digital soil erodibility mapping by soilscape trending and kriging. **Land Degradation & Development**, p.1-24, 2018. doi:10.1002/ldr.3057

Beguín, J., Fuglstad, G., Mansuy, N., Paré, D. Predicting soil properties in the Canadian boreal forest with limited data: Comparison of spatial and non-spatial statistical approaches. **Geoderma**, v.306, p. 195–205, 2017. doi:10.1016/j.geoderma.2017.06.016

Belkhir, L., Tiri, A., Mouni, L. Study of the spatial distribution of groundwater quality index using geostatistical models. **Groundwater for Sustainable Development**, 100473, 2020. doi:10.1016/j.gsd.2020.100473

Berrar, D., Flach, P. Caveats and pitfalls of ROC analysis in clinical microarray research (and how to avoid them). **Briefings in Bioinformatics**, v.13, n.1, p.83-97, 2011. doi:10.1093/bib/bbr008.

Brus, D.J., Noij, I Designing sampling schemes for effect monitoring of nutrient leaching from agricultural soils. **Eur. J. Soil Sci**. v. 59, n.2, p. 292–303, 2008.

Burrough, P. A. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. **Journal of Soil Science**, v.40, n. 3, p. 477-492, 1989. doi:10.1111/j.1365-2389.1989.tb01290.x

Chakraborty, S., Weindorf, D.C., Deb, S., Li, B., Paul, S., Choudhury, A., Ray, D.P. Rapid assessment of regional soil arsenic pollution risk via diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 289, p. 72–81, 2017. doi:10.1016/j.geoderma.2016.11.024

Chen, Y., Yu, J., Khan, S. Spatial sensitivity analysis of multicriteria weights in GIS-based land suitability evaluation. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n.12, p. 1582–1591, 2010. doi:10.1016/j.envsoft.2010.06.001

Chen, H., Wood, M.D, Linstead, C., and Maltby, E. Uncertainty analysis in a GIS-based multicriteria analysis tool for river catchment management. **Environmental modelling & software**, v. 26, n.4, p. 395-405, 2011, doi: 10.1016/j.envsoft.2010.09.005.

Choubin, B., Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Feizizadeh, B., Pourghasemi, H. R. Application of Fuzzy Analytical Network Process Model for Analyzing the Gully Erosion Susceptibility. **Natural Hazards GIS-Based Spatial Modeling Using Data Mining Techniques**, p.105–125, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-73383-8\_5

Crosetto, M., Tarantola, S., Saltelli, A. Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS **Agric. Ecosyst. Environ**, vol. 81, n.1, p.71–79, 2000. doi: 10.1016/s0167-8809(00)00169-9

Douaoui, A. E. K., Nicolas, H. , Walter, C. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. **Geoderma**, v. 134, n. 1–2, p. 217–230, 2006. doi:10.1016/j.geoderma.2005.10.009

Eastman, J. R. **IDRISI selva: guide to GIS and image processing**, 2012, 322p.

Eastman, J.R. **Idrisi 3.2 – Release 2: Tutorial**. Worcester, Massachusetts: Clark University, 2001.

Eker, R., Aydin, A. Assessment of forest road conditions in terms of landslide susceptibility: a case study in Yığılca forest directorate (Turkey). **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 38, p. 281–290, 2014. doi: 10.3906/tar-1303-12.

Feizizadeh, B., Blaschke, T. Uncertainty analysis of GIS-Multicriteria based landslide susceptibility mapping. **Int. J. Geogr. Inf. Sci.**, v. 28, n.3, p.610-638, 2013. doi:10.1080/13658816.2013.869821.

Feizizadeh, B., Jankowski, P., Blaschke, T. A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multicriteria decision analysis. **Computers & Geosciences**, v. 64, p. 81–95, 2014. doi:10.1016/j.cageo.2013.11.009

Ferretti, V., Pomarico, S. Ecological land suitability analysis through spatial indicators: An application of the Analytic Network Process technique and Ordered Weighted Average approach. **Ecological Indicators**, v. 34, p. 507-519, 2013. doi: 10.1016/j.ecolind.2013.06.005.

Ganji, A., Khalili, D., Javan, M. Uncertainty in the design and simulation of reservoirs. **Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering**, v. 25 (B4), p. 729-736, 2001.

Heim, A., Wehrli, L., Eugster, W., Schmidt, M.W.I. Effects of sampling design on the probability to detect soil carbon stock changes at the Swiss CarboEurope site Lägeren. **Geoderma**, v. 149, n. 3-4, p. 347–354, 2009. doi:10.1016/j.geoderma.2008.12.018

Hijmans, R. J., Etten, J. V. Raster: Geographic data analysis and modeling. **R package Version 2.4-15**, v.2, p. 0-31, 2015.

Jost, G., Heuvelink, G. B. M., Papritz, A. Analysing the space-time distribution of soil water storage of a forest ecosystem using spatio-temporal kriging. **Geoderma**, v. 128, n. 3–4, p. 258–273, 2005. doi:10.1016/j.geoderma.2005.04.008

Khanchoul, K., Boubehziz, S. Spatial variability of soil erodibility at el hammam catchment, northeast of Algeria. **Environment & Ecosystem Science**, v. 3, n.1, p. 17-25, 2019. doi: 10.26480/ees.01.2019.17.25

Kulikov, M., Schickhoff, U., Gröngröft, A., Borchardt, P. Modelling Soil Erodibility in Mountain Rangelands of South-Western Kyrgyzstan. **Pedosphere**, 2017. doi: 10.1016/s1002-0160(17)60402-8

Kumar, R., Indrayan, A. Receiver operating characteristic (ROC) curve for medical researchers. **Indian Pediatr.**, v. 48, n.4, p. 277-287, 2011. doi: 10.1007/s13312-011-0055-4

Lewin-Koh, N. J., Bivand. MAPTOOLS. R: Tools for reading and handling spatial objects. **R package**, v. 8, p.20, 2012.

Li, J., Wan, H., Shang, S.. Comparison of interpolation methods for mapping layered soil particle-size fractions and texture in an arid oasis. **Catena**, v. 190, 104514, 2020. doi:10.1016/j.catena.2020.104514

Ligmann-Zielinska, A. Spatially explicit sensitivity analysis of an agent-based model of land use change. **Int. J. Geogr. Inf. Sci.**, v. 27, n.9, p. 1764-1781, 2013. doi: 10.1080/13658816.2013.782613.

Liong, S.-Y., Lim, W. H., Paudyal, G. N. River stage forecasting in Bangladesh: neural network approach. **J. Comput. Civ. Eng.**, v. 14, n.1, p.1-8, 2000 doi: 10.1061/(asce)0887-3801(2000)14:1(1)

Loucks, D. P., Van Beek, E., Stedinger, J. R., Dijkman, J. P., Villars, M. T. Water Resources Systems Planning and Management: an Introduction to Methods, **Models and Applications**. UNESCO, Paris, p. 93-177, 2005.

Ma, Y., Minasny, B., Wu, C. Mapping key soil properties to support agricultural production in Eastern China. **Geoderma Regional**, v. 10, p.144–153, 2017. doi:10.1016/j.geodrs.2017.06.002.

Madenoglu, S., Atalay, F., Erpul, G. Avaliação da incerteza da erodibilidade do solo por simulação sequencial gaussiana direta (DSIM) em usos do solo semiárido. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104731, 2020. doi: 10.1016 / j.still.2020.104731

Malczewski, J., Chapman, T., Flegel, C., Walters, D., Shrubsole, D., Healy, M.A. GIS-multicriteria evaluation with Ordered Weighted Averaging (OWA): developing management strategies for rehabilitation and enhancement projects in the Cedar Creek watershed. **Environment and Planning**, v.35, n.10, p.1769-1784, 2003. doi: 10.1068/a35156.

Malczewski, J., Rinner, C. **Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science**. London: Springer. 331p, 2015. doi: 10.1007/978-3-540-74757-4

Malczewski, J. Multiple criteria decision analysis and geographic information systems. *In: Trends in multiple criteria decision analysis*. **Springer US**. p. 369-395, 2010.

Manap, M. A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W. N. A., Ramli, M.F. Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS **Am. J. Geosci.**, v.7, n.2, p.711-724, 2014. doi:10.1007 / s12517-012-0795-z.

Mashalaba, L., Galleguillos, M., Seguel, O., Poblete-Olivares, J. Predicting spatial variability of selected soil properties using digital soil mapping in a rainfed vineyard of central Chile. **Geoderma Regional**, e00289, 2020. doi:10.1016/j.geodrs.2020.e00289

- Matheron, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v.58, n.8, p. 1246–1266, 1963. doi:10.2113/gsecongeo.58.8.1246
- McBratney, A. B., Odeh, I. O. A. Application of Fuzzy sets in soil science: Fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions, **Geoderma**, v. 77, n.2-4, p. 85-113, 1997. doi: 10.1016/s0016-7061(97)00017-7
- Nampak, H., Pradhan, B., Manap, M. A. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. **Journal of Hydrology**, v. 513, p. 283–300, 2014. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.02.053
- Nikishova, A., Comi, G. E., Hoekstra, A. G. Redução de dimensão baseada em análise de sensibilidade de modelos multiescala. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 170, p. 205-220, 2019. doi: 10.1016 / j.matcom.2019.10.013
- Oliver, M. A., Webster, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v. 113, p. 56–69, 2014. doi: 10.1016/j.catena.2013.09.006
- Opon, J., Henry, M. A multicriteria analytical framework for sustainability evaluation under methodological uncertainties. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 83, 106403, 2020. doi:10.1016/j.eiar.2020.106403
- Pan, F., Peters-Lidard, C. D., King, A. W. Inverse method for estimating the spatial variability of soil particle size distribution from observed soil moisture. **J. Hydrol. Eng**, v. 15, n.11, p. 931–938, 2010. doi: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000274
- Papierowska, E., Szatyłowicz, J., Ruta, M., Łachacz, A., Gnatowski, T., Stańczyk, T. Water repellency of soils on unpaved roads in coniferous forests. **Catena**, v. 195, 104784, 2020. doi:10.1016/j.catena.2020.104784
- Park, I., Kim, Y., Lee, S. Groundwater Productivity Potential Mapping Using Evidential Belief Function. **Groundwater**, v. 52 (S1), p. 201–207, 2014. doi:10.1111/gwat.12197
- 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, e059, 2016. doi:e059.10.5424/fs/2016252-07815.

- Pebesma, E. J., R. S. Bivand. Classes and methods for spatial data in R. **R News**, v. 5, n.2, 2005.
- Pebesma, E. J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. **Computers & Geosciences**, v. 30, n.7, p. 683-691, 2004.
- Pereira, S., Zêzere, J. L., Bateira, C. Technical note: assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. **Nat Hazards Earth Syst Sci**, v. 12, n.4, p. 979–988, 2012. doi: 10.5194/nhess-12-979-2012
- Pianosi, F., Wagener, T. A simple and efficient method for global sensitivity analysis based on cumulative distribution functions. **Environmental Modelling and Software**, v. 67, n. 4, p. 1-11, 2015. doi:10.1016/j.envsoft.2015.01.004.
- Poggio, L., Gimona, A. 3D mapping of soil texture in Scotland. **Geoderma Regional**, v. 9, p. 5–16, 2017. doi:10.1016/j.geodrs.2016.11.003
- Pradhan, B. Groundwater potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques. **Open Geosciences**, v. 1, n.1, p. 120-129, 2009. doi: 10.2478/v10085-009-0008-5
- Pradhan, B., Lee, S. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n.6, p.747–759, 2010. doi:10.1016/j.envsoft.2009.10.016
- Prati, R. C., Batista, G. E. A. P. A., Monard, M. C. Evaluating Classifiers Using ROC Curves. **Journal IEEE América Latina**, v. 6, n. 2, p. 215-222, 2008. doi:10.1109/TLA.2008.4609920.
- Punzo, V., Marcello, M., Biagio, C. Do we really need to calibrate all the parameters? Variance-based sensitivity analysis to simplify microscopic traffic flow models. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 16, n.1, p. 184–193, 2015. doi:10.1109/tits.2014.2331453
- Quijano, L., Beguería, S., Gaspar, L., Navas, A. Estimating erosion rates using measurements and WATEM/SEDEM in a Mediterranean cultivated field. **Catena**, v. 138, p. 38–51, 2016. doi:10.1016/j.catena.2015.11.009

Rahmati, O., Kornejady, A., Samadi, M., Nobre, A. D., Melesse, A. M. Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. **Environmental Modelling & Software**, v. 102, p. 1–12, 2018. doi:10.1016/j.envsoft.2018.01.004

Ravalico, J. K., Dandy, G. C., Maier, H. R. Management Option Rank Equivalence (MORE) – A new method of sensitivity analysis for decision-making. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n.2, p. 171–181, 2010. doi:10.1016/j.envsoft.2009.06.012

Riffenburgh, R. H., Gillen, D. L. Tolerance, prediction, and confidence intervals. **Statistics in Medicine**, p. 161–182, 2020. doi:10.1016/b978-0-12-815328-4.00008-5

Rosero, E., Yang, Z. L., Wagener, T., Gulden, L.E., Yatheendradas, S., Niu, G.Y. Quantifying parameter sensitivity, interaction, and transferability in hydrologically enhanced versions of the Noah land surface model over transition zones during the warm season. **J. Geophys. Res. Atmos**, v. 115 (D3), p.1-21, 2010. doi: 10.1029/2009jd012035

Saaty, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation**. New York: McGraw, 1980, 281p.

Santos, H. G. dos, Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. dos, Oliveira, V. A. de, Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A. de, Araujo Filho, J. C. de, Oliveira, J. B. de; Cunha, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. – 5. ed., – Brasília, DF, Embrapa, 2018, 356 p.

Silva, V. A. M., Mello, K. de, Vettorazzi, C. A., Costa, D. R. da, Valente, R. A. Priority areas for forest conservation, aiming at the maintenance of water resources, through the multicriteria evaluation. **Árvore**, v.41, n.1, 2017. doi: 10.1590/1806-90882017000100019

Song, X., Brus, D.J., Liu, F., Li, D., Zhao, Y., Yang, J. Mapping soil organic carbon content by geographically weighted regression: a case study in the Heihe River Basin, China. **Geoderma**, v. 261, p. 11–22, 2016. doi:10.1016/j.geoderma.2015.06.024

Sun, X. L., Wu, Y. J., Wang, H. L., Zhao, Y. G., Zhang, G. L. Mapping soil particle size fractions using compositional kriging, cokriging and additive log-ratio Cokriging in two case studies. **Math. Geosci**, v. 46, n.4, p. 429–443, 2014. doi: 10.1007/s11004-013-9512-z

Thompson, J. A., Roecker, S., Grunwald, S., Owens, P.R. Digital soil mapping: interactions with and applications for hydrogeology. *In*: Lin, H. (Ed.), *Hydrogeology-Synergistically Integration of Soil Science and Hydrology*, first ed. Academic Press, Oxford UK, p. 665–709, 2012.

Valente, R. de O. A., Vettorazzi, C. A. Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n.6, p. 1408–1417, 2008. doi:10.1016/j.foreco.2008.07.006

Valente, R. A., Petean, F. C. de S., Vettorazzi, C. A. Multicriteria decision analysis for prioritizing areas for forest restoration. **CERNE**, v. 23, n. 1, p. 53- 60, 2017. doi:10.1590/01047760201723012258

Valente, R. A., de Mello, K., Metedieri, J. F., Américo, C. A multicriteria evaluation approach to set forest restoration priorities based on water ecosystem services. **Journal of Environmental Management**, v.285, 112049, 2021. doi:10.1016/j.jenvman.2021.112049

Van Werkhoven, K., Wagener, T., Reed, P., Tang, Y. Characterization of watershed model behavior across a hydroclimatic gradient. **Water Resour. Res**, v.44, n.1, p. 1-16, 2008. doi: 10.1029/2007wr006271

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. doi:10.1016/j.ecoleng.2016.05.069

Wadoux, A. M. J-C, Brus, D.J., Heuvelink, G. B. M. Accounting for non-stationary variance in geostatistical mapping of soil properties. **Geoderma**, v. 324, p. 138–147, 2018. doi:10.1016/j.geoderma.2018.03.010

Wang, Z., Shi, W. Robust variogram estimation combined with isometric log-ratio transformation for improved accuracy of soil particle-size fraction mapping. **Geoderma**, v. 324, p. 56–66, 2018. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.03.007

Xiong, Y., Zuo, R. GIS-based rare events logistic regression for mineral prospectivity mapping, **Computers and Geosciences**, v. 111, p. 18-25, 2017. doi: 10.1016/j.cageo.2017.10.005.

Yesilnacar, E. K. **The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey**, 423 f., 2005, Ph.D. Thesis Department of Geomatics the University of Melbourne.

Zadeh, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v.8, n.3, p. 338–353, 1965. doi: 10.1016/s0019-9958(65)90241-x

Zhang, Y., Ji, W., Saurette, D. D., Easher, T. H., Li, H., Shi, Z., Adamchuk, V.I., Biswas, A. Three-dimensional digital soil mapping of multiple soil properties at a field-scale using regression kriging. **Geoderma**, v. 366, 114253, 2020. doi:10.1016/j.geoderma.2020.114253.

Zhao, C., Shao, M., Jia, X., Zhang, C. Particle size distribution of soils (0–500 cm) in the Loess Plateau. China. **Geoderma Regional**, v.7, n.3, p. 251–258, 2016. doi: 10.1016/j.geodrs.2016.05.003

Zhou, Z. M., Zhang, G. H., Wang, J. Z., Yan, M. J. Risk assessment of soil salinity by multiple-variable indicator kriging in the low plain around the Bohai Sea. **Shuli Xuebao**, v. 42, n. 10, p.1144–1151, 2011.

Zhu, A. X., Liu, J., Du, F., Zhang, S. J., Qin, C. Z., Burt, J. Predictive soil mapping with limited sample data. **Eur. J. Soil Sci**, v. 66, n. 3, p. 535–547, 2015. doi:10.1111/ejss.12244

### **CAPÍTULO 3: Fragilidade ambiental em plantios florestais comerciais visando o manejo sustentável.**

#### **Resumo**

As estradas florestais podem se tornar potenciais fontes de impactos ambientais, principalmente relacionados à dinâmica hídrica e à produção de sedimentos. Neste sentido, a fragilidade ambiental pode suportar o incremento da gestão da paisagem, por meio da integração de diferentes critérios. Neste estudo, espacializou-se a fragilidade ambiental da área de estudo a partir da agregação dos critérios utilizando o método de avaliação multicriterial. Os critérios para a fragilidade ambiental serviram para direcionar o planejamento de estradas florestais e foram definidos a partir da literatura sendo eles a declividade, a distância à rede hidrográfica, a erodibilidade do solo e o índice topográfico de umidade. Considerando a importância desses critérios para compor o mapa de fragilidade ambiental; 0,08% da fazenda A foi classificada em fragilidade muito alta; 17,79% alta; 60,96% média; 21,15% baixa; e 0,01% muito baixa. Na fazenda B, 1,16% da área foi classificada em fragilidade muito alta; 26,05% alta, 56,42% média; 16,32% baixa; e 0,05% muito baixa. No que se refere ao nível de fragilidade associado às estradas existentes; 0,22% da fazenda A está classificada a uma fragilidade muito alta; 19,35% alta; 60,12% média; 20,10% baixa; e 0,21% muito baixa. Na fazenda B 2,72% das estradas existentes, foram classificadas em uma fragilidade muito alta; 33,24% alta; 44,21% média; 18,91% baixa; e 0,91% muito baixa. A análise de componentes principais indicou quais critérios mais influenciaram a fragilidade ambiental da paisagem em cada fazenda, mostrando suas correlações. Assim conclui-se que é possível inferir que os critérios utilizados para o diagnóstico foram sensíveis às características do ambiente natural. A identificação da fragilidade ambiental é componente essencial do planejamento florestal, incluindo aquele voltado para a manutenção de estradas em áreas florestais. Assim ela contribui para a implementação de mecanismos de sustentação do ecossistema, visando à preservação dos recursos naturais.

Palavras-chave: planejamento de estradas florestais; erosão; análise espacial; planejamento florestal; estrada não pavimentada, avaliação multicriterial.

#### **Abstract**

Forest roads can become potential sources of environmental impacts, mainly related to hydrological dynamics and sediment production. In this sense, environmental fragility can

support the increase of landscape management by integrating different criteria. In this study, environmental fragility was spatialized in the study area by aggregating criteria using a multicriteria evaluation method. The criteria for environmental fragility were used to guide forest road planning and were defined based on literature, namely slope, distance from the hydrographic network, soil erodibility, and topographic wetness index. These criteria were used to guide forest road management. Considering the importance of these criteria to compose the environmental fragility map, 0.08% of farm A was classified as having very high fragility, 17.79% high fragility, 60.96% moderate fragility, 21.15% low fragility, and 0.01% very low fragility. In farm B, 1.16% of the area had very high fragility, 26.05% high fragility, 56.42% moderate fragility, 16.32% low fragility, and 0.05% very low fragility. Regarding the level of fragility associated with the existing roads, 0.22% of farm A is classified as having very high fragility, 19.35% high fragility, 60.12% moderate fragility, 20.10% low fragility, and 0.21% very low fragility. In farm B, 2.72% of the existing roads had very high fragility, 33.24% high fragility, 44.21% moderate fragility, 18.91% low fragility, and 0.91% very low fragility. The principal component analysis indicated which criteria most influenced the environmental fragility of the landscape on each farm, showing their correlations. It can be inferred that the criteria used for the diagnosis were sensitive to the characteristics of the natural environment. Identifying environmental fragility is an essential component of forest planning, including that aimed at maintaining roads in forest areas. Thus, the spatialization of environmental fragility contributes to the implementation of ecosystem support mechanisms to preserve natural resources.

Keywords: forest road planning; erosion; spatial analysis; forest planning; unpaved road; multicriteria evaluation.

## **1. Introdução**

A área comercial de plantios florestais se expande mundialmente para suprir a demanda global por madeira, combustível e celulose (Heilmayr, 2014). Porém, isso traz efeitos negativos em áreas de mata nativa (Liu et al., 2018) e na provisão de serviços ecossistêmicos (França et al., 2022). De acordo com Ahammad et al. (2021), o papel dos serviços ecossistêmicos nas políticas de gestão de recursos naturais está ganhando popularidade globalmente como um meio de fornecer maior proteção para a conservação da biodiversidade, gestão integrada de recursos naturais e promover a gestão florestal sustentável.

Quando se considera os plantios comerciais, há exemplos positivos de operações de manejo florestal (Liu et al., 2018) com avanços significativos na silvicultura global e na conservação florestal (Begotti et al., 2018; Tavares et al., 2019; Pliscoff et al., 2020), e conservação da paisagem (Daniel e Schroeder, 1979; Angelstam et al., 2020). As práticas silviculturais sustentáveis são importantes para mitigar mudanças climáticas, danos ao solo e perdas ecológicas (Jack e Long, 1996; Fonseca et al., 2009; Vides-Borrell et al., 2019).

No entanto, a produção de toras é focada em custo reduzido e receita máxima, que está desconectada do contexto de uso sustentável da paisagem (Ewald, 2001). Com isso a modelagem e otimização da paisagem são áreas promissoras de pesquisa (Kaya et al., 2016) e podem levar a uma melhor produção na indústria madeireira (Liu e Lin, 2015), considerando o arranjo espacial do povoamento (França et al., 2022), e melhorias na infraestrutura dos empreendimentos florestais para transporte e colheita.

Os desafios para o manejo florestal mundial, estão diretamente relacionados às novas demandas regionais e à integração com as inovações tecnológicas (França et al., 2022). Atualmente, por exemplo, máquinas automatizadas para transporte florestal estão se desenvolvendo (Rien e Francis, 2021). E as operações de colheita florestal em áreas restritas vêm aderindo aos princípios de manejo florestal sustentável (Marchi et al., 2018; McEwan, 2019).

Considerando as operações florestais, pode-se citar as estradas florestais como um pré-requisito fundamental para a sustentabilidade da gestão dos recursos florestais (Jaafari et al., 2015), pois elas oferecem muitos benefícios, como acesso à extração de madeira, prevenção de incêndios, recreação e pesquisa. Esses benefícios levaram a uma demanda crescente para construir e ampliar ainda mais estradas florestais ao longo dos anos.

A rede de estradas em qualquer tipo de floresta para a produção e extração de madeira influencia a viabilidade e lucratividade da operação de extração de madeira (Murray, 1998; Abdi et al., 2009; Cavalli e Grigolato, 2010; Norizah e Mohd Hasmadi, 2012). O planejamento inadequado de estradas florestais causa impactos ambientais para florestas nativas, como aumento do desmatamento, perda de biodiversidade, erosão, deposição de sedimentos em cursos de água, distúrbios da flora e da fauna, fragmentação de habitat, com custos mais altos de construção de estradas (Çaliskan, 2017; Siqueira-Gay et al., 2020) e sua manutenção.

A infraestrutura do transporte é sustentada como um dos principais fatores que contribuem para essas questões de interesse global (Geneletti, 2003, 2006), mas recebe pouca atenção na ciência da conservação (Mann et al., 2019). A degradação do ecossistema em todo

o mundo é atribuída principalmente a perda e fragmentação da cobertura florestal (Newman et al., 2014).

Há evidências de que melhorias no planejamento e localização de estradas florestais reduzam os efeitos negativos no ambiente florestal (Jaafari et al., 2014; Jaafari et al., 2015). Por outro lado, estradas de acesso mal planejadas, podem afetar a produtividade florestal, danificando árvores e mudas residuais, removendo nutrientes do local, e compactando, sulcando e erodindo o solo (Sessions, 2007).

Alguns problemas de espacialização do planejamento florestal estão em aberto e ainda teóricos, especialmente aqueles que visam alcançar florestas esteticamente agradáveis e economicamente viáveis (França et al., 2022). Porém, os estudos sobre planejamento de estradas florestais demonstram os avanços no uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e os vários métodos de tomada de decisão, análise e otimização, que destaca a importância da pesquisa em estradas florestais com diferentes variáveis e metodologias aplicadas em diferentes florestas e níveis de planejamento (Kazama et al., 2021).

Estudos que quantificam as propriedades ambientais, como a fragilidade, estado de conservação, exploração de recursos e necessidades de reabilitação, são essenciais para que os tomadores de decisão façam uma gestão e conservação dos recursos naturais de forma racional (Villa e McLeod, 2002; Macedo et al., 2018). A fragilidade ambiental é entendida como a suscetibilidade do ecossistema às mudanças em seu equilíbrio dinâmico, de acordo com suas características intrínsecas e extrínsecas (Anjinho et al., 2021), as quais devem ser estudadas para melhorar a gestão da paisagem (Manfré et al., 2013; Macedo et al., 2018).

A análise de fragilidade ambiental pode ser realizada a partir da integração de diferentes critérios ambientais espacializados no ambiente SIG, visando o gerenciamento dessas informações. Neste contexto, a avaliação multicriterial apresenta-se como uma ferramenta importante para analisar a fragilidade ambiental, que de acordo com Malczewski (2006) múltiplas variáveis espaciais podem ser integradas para auxiliar na tomada de decisão.

Estudos recentes usam o conceito de fragilidade ambiental para avaliar a suscetibilidade de ecossistemas naturais sob diversas condições, incluindo vulnerabilidade do habitat ecológico (Caniani et al., 2016), poluição do aquífero (Caniani et al., 2015; Jesiya e Gopinath, 2019), eventos de inundação (Nasiri et al., 2018; Santos et al., 2019) e degradação ambiental (Macedo et al., 2018; Arriagada et al., 2019), porém, para plantios comerciais, sobretudo voltado para o planejamento de estradas florestais os estudos são escassos.

A classificação da fragilidade ambiental informa o zoneamento ambiental na avaliação do uso atual da terra e se deve ser mantido ou modificado para minimizar os processos de erosão

e proteger os recursos hídricos (Manfré et al., 2013; Cruz et al., 2017; Anjinho et al., 2021). Portanto, avaliar a fragilidade ambiental e como os critérios ambientais podem influenciar o planejamento florestal em sua totalidade, pode auxiliar no manejo florestal sustentável.

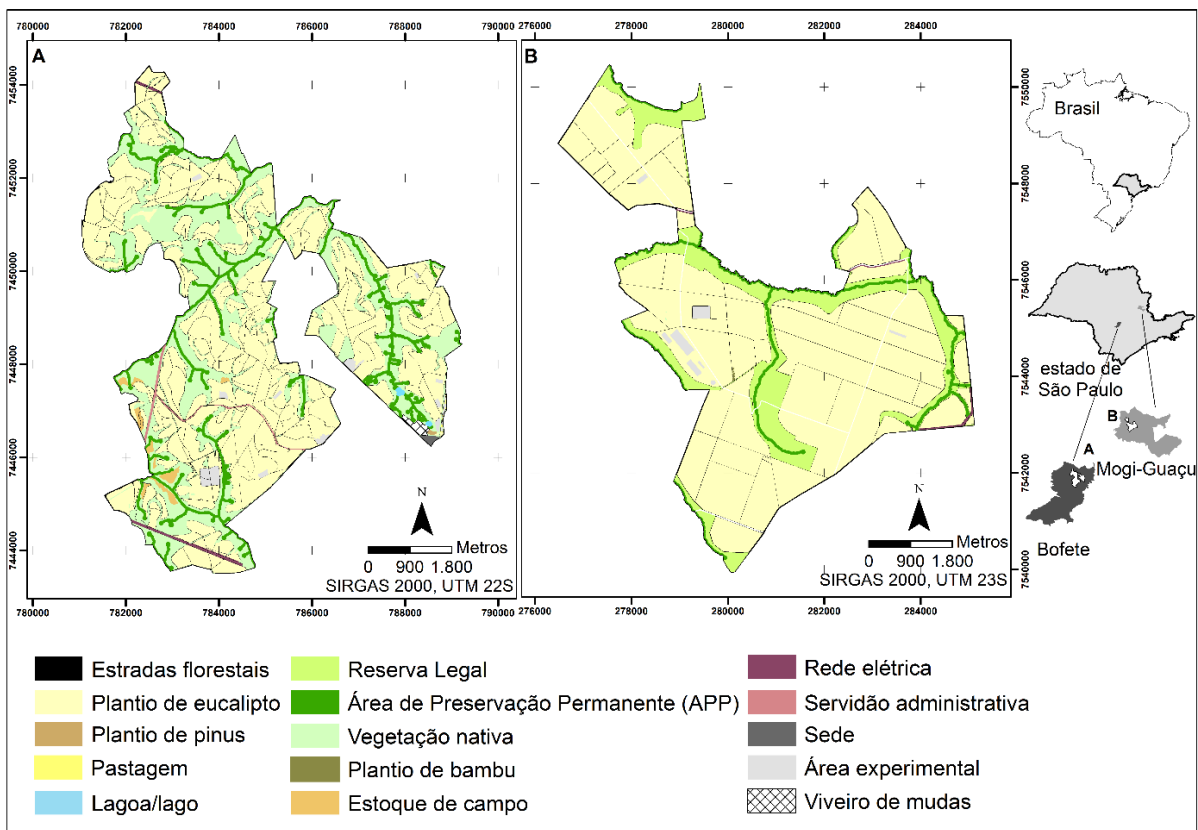
Neste contexto, o objetivo deste estudo foi analisar a fragilidade ambiental de duas paisagens em que se tem o predomínio de plantios florestais comerciais, por meio da avaliação multicriterial, com foco no planejamento de estradas florestais.

## 2. Material e métodos

### 2.1. Área de estudo

Realizou-se o estudo em duas fazendas florestais, sendo uma localizada no município de Bofete (Figura 1A) e a outra no município de Mogi-Guaçu (Figura 1B), que compõem uma das mais importantes regiões produtoras de madeira do estado de São Paulo. As fazendas estão em região de domínio dos biomas Mata Atlântica e Cerrado, respectivamente, (IBGE, 2022) e o manejo sustentável se torna fundamental para a manutenção de seus serviços ecossistêmicos.

**Figura 1-** Uso e cobertura do solo da fazenda florestal A no município de Bofete e da fazenda florestal B no município de Mogi-Guaçu, estado de São Paulo (SP), Brasil.



Fonte: base de dados das empresas florestais (2021), organização: autoria própria

A fazenda florestal A possui aproximadamente 3.900 ha, sendo 56,8% ocupados por plantios de eucalipto, destinadas ao abastecimento da indústria de painéis. A atual rede de estradas florestais, utilizada para o transporte de madeira, está distribuída pela fazenda, ocupando 3,9% de sua área total.

A fazenda possui fragmentos de mata nativa que estão espalhados entre a floresta plantada, cobrindo 27,6% da propriedade, principalmente próximo aos rios, compondo a zona ciliar, definida pela legislação brasileira, também conhecida como Área de Preservação Permanente (APP). Ainda possui outros usos do solo como estoque de campo (áreas com toras de eucalipto liberadas do plantio pós-corte), rede elétrica, viveiro de mudas, sede (área com escritórios administrativos da empresa), que totalizam 2,73% de sua área (Figura 1A).

A fazenda florestal B possui 3.380 ha, sendo 77% ocupados por plantios de eucalipto, destinado ao abastecimento da indústria de papel e celulose. A atual rede de estradas corresponde a 1,9% da área total da fazenda. A fazenda possui áreas de mata nativa cobrindo 19,84%, composta por APP e Reserva legal (RL), também definida pela legislação brasileira (Brasil - Lei nº 12.651/12). Ainda possui áreas experimentais e áreas com plantios de bambu que chegam a aproximadamente 1% do total da área (Figura 1B).

Em relação à altitude, o município de Bofete encontra-se em 617 m (Alvares et al., 2013), possuindo a fazenda A variações entre 483 m e 647 m de altitude. O município de Mogi-Guaçu encontra-se em 649 m (Alvares et al., 2013), possuindo a fazenda B, variações entre 589 m e 727 m de altitude. O clima da fazenda A, considerando o sistema Köppen, é do tipo Cfa, e da fazenda B é do tipo Cwa de acordo com Alvares et al. (2013). A precipitação média anual, em Bofete, é de 1.351 mm e a sua temperatura média é de 20,5 °C, e para o município de Mogi-guaçu a média anual de precipitação é de, 1.481 mm e a sua temperatura média é de 21,6 °C (Climate-Data, 2022).

Em relação ao tipo de solo, os dados levantados pelas empresas proprietárias das fazendas, a fazenda A tem 47,47% da área ocupada por Argissolos; 7,75% por Latossolos; 7,24% por Neossolos; e 37,54% da área apresenta uma unidade de mapeamento heterogênea composta pelos tipos de solo Cambissolo, Neossolo e Argissolo. A fazenda B possui 89,6% da área ocupada por Latossolo e 10,4% composto por Gleisolos.

A escolha dessas fazendas como área de estudo é destacada devido à sua composição de diferentes tipos de solo e variações dos atributos ambientais, o que possibilita um planejamento florestal mais adequado, especialmente no que diz respeito às estradas florestais, a partir do entendimento da fragilidade ambiental.

## 2.2. Critérios ambientais

A estrutura do modelo conceitual para avaliar a fragilidade ambiental das fazendas baseou-se em atributos ambientais de solo, relevo e água, os quais são o principal componente de um projeto viário, principalmente avaliando sua viabilidade, custo de construção e manutenção (Meignan et al., 2015). Ao associar esses atributos a um projeto viário, se pode ter uma malha viária bem planejada, essencial para facilitar o manejo florestal sustentável, bem como a proteção e manutenção dos recursos naturais.

Nesse contexto, selecionaram-se os critérios ambientais, considerando o conhecimento da empresa florestal (ou seja, equipe técnica e gestores) sobre localização e manutenção de estradas, colheita florestal, solo e planejamento ambiental, além da consulta à literatura.

Assim, obtiveram-se os critérios de erodibilidade do solo (fator K), declividade, distância à rede hidrográfica (DRH) e índice topográfico de umidade (ITU), como representativos de atributos ambientais das paisagens avaliadas.

Os mapas de critérios foram gerados (com resolução espacial de 5 m) a partir do banco de dados cartográficos da empresa, sendo eles os mapas de solos, topográfico e de uso e cobertura do solo. O critério erodibilidade foi gerado a partir de dados de solos, os quais foram espacializados a partir do método de interpolação de krigagem, conforme metodologia apresentada no capítulo 2.

Os critérios declividade e ITU, foram extraídos do Modelo Digital de Elevação (MDE), baseado nas curvas de nível (equidistância de 5 metros, escala 1:10000). Já para obter-se o critério distância à rede hidrográfica (DRH), calculou-se a distância euclidiana a partir das drenagens das respectivas fazendas.

Além dos critérios, identificou-se as áreas de restrição formadas por aquelas onde as estradas florestais não podem ser alocadas, como áreas de preservação permanente (APP), vegetação nativa, sede, viveiro, rede elétrica, lagos e lagoas, plantios de pinus, pastagem, Reserva Legal (RL), plantios de bambu, servidão administrativa e área experimental. Essas áreas são, portanto, excluídas dos mapas de critérios e do mapa final posteriormente.

## 2.3. Fragilidade ambiental

Normalizou-se os critérios para uma escala comum variando de 0 a 255 bytes, por meio de uma função linear crescente para o caso dos critérios declividade, o fator K e ITU, garantindo que os maiores valores da escala associados aos maiores valores dos mapas, respectivamente.

Por outro lado, a função linear decrescente suportou a normalização do critério DRH, garantindo os maiores valores associados onde há menor distância à rede de drenagem. Destaca-se que foram avaliados os valores originais dos mapas de critérios, eliminando os valores de seus *outliers*.

As áreas de fragilidade ambiental foram obtidas por meio da agregação de critérios ambientais, utilizando-se o método de Combinação Linear Ponderada (CLP) (Equação 1), um método tradicional da AMC.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i X_i * \prod_{j=1}^K c_j \quad (1)$$

Sendo: S: valor da pontuação final;  $w_i$  (denominados pesos fatoriais): peso do parâmetro fator  $i$  (com  $i=1, \dots, n$ );  $n$ : número de critérios;  $x_j$ : valor normalizado para o mesmo fator;  $c_j$ : score (0 ou 255) do parâmetro de exclusão (com  $j=1, \dots, k$ ); e  $k$ : número de parâmetros de exclusão.

Por fim, reclassificou os mapas de fragilidade das fazendas florestais em cinco classes de tamanhos iguais, sendo elas muito alta; alta; média; baixa; e muito baixa. Como proposto por Vettorazzi e Valente (2016), com classes com homogeneidade de frequência de seus valores.

É importante destacar que, após a espacialização da fragilidade ambiental em toda a fazenda, também foi realizada a classificação específica das estradas florestais para entender o atual nível de fragilidade presente nessas áreas.

#### 2.4. Análise de componentes principais

Realizou-se uma Análise de Componentes Principais (ACP), para analisar as inter-relações entre os critérios e explicar esses critérios em termos de suas dimensões intrínsecas (componentes). A análise foi realizada no *software* R Core Team considerando os critérios declividade, DRH, erodibilidade e ITU, a partir dos autovalores e matriz de correlação.

A ACP é uma técnica estatística multivariada usada para extrair informações de dados multivariados correlacionados de dimensão superior, projetando-os em um subespaço de dimensão inferior (Forkman et al., 2019). Dado um conjunto de variáveis correlacionadas, um conjunto menor de variáveis não correlacionadas chamadas de componentes principais (CPs), combinações lineares das variáveis originais, são produzidas.

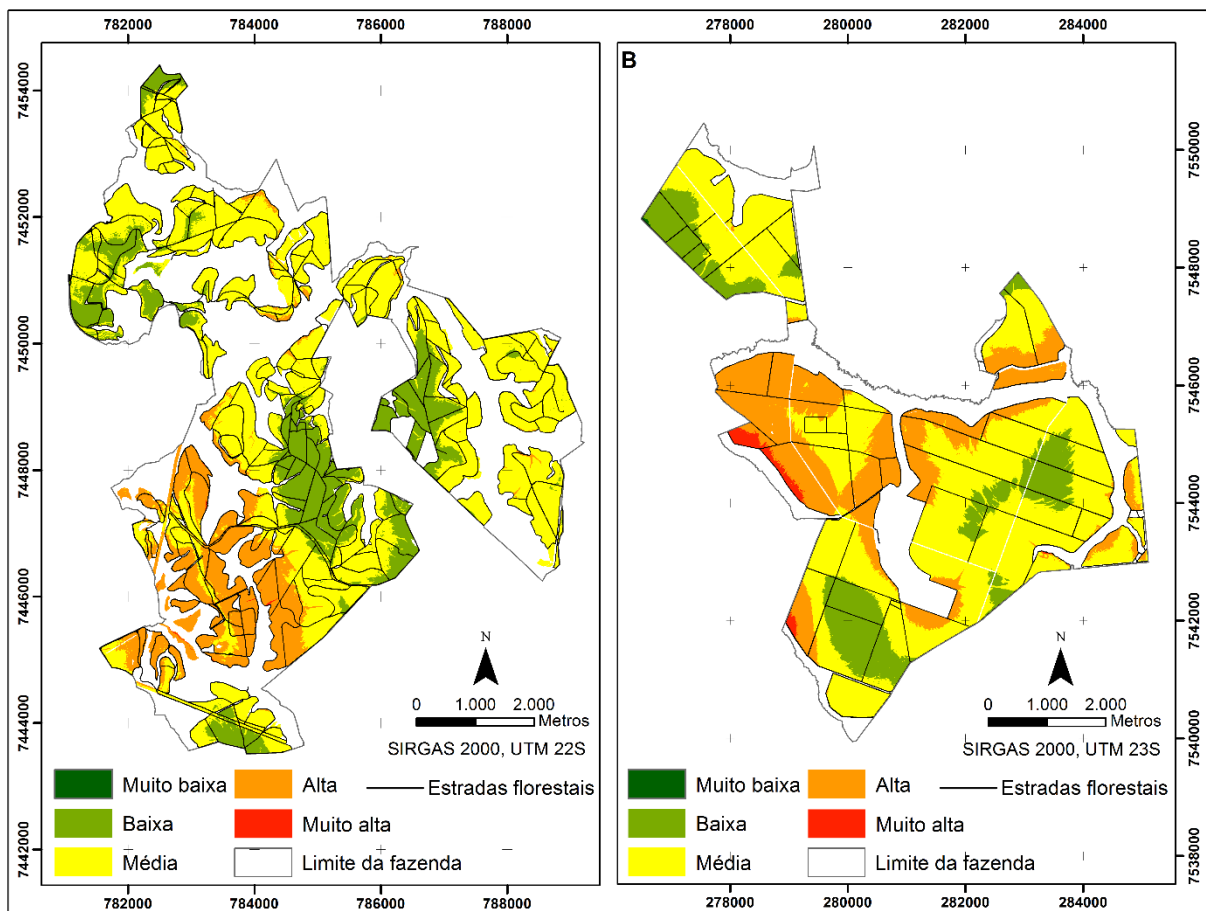
Esses novos conjuntos de variáveis são calculados a partir da matriz de variância-covariância das variáveis originais. Os primeiros CPs são responsáveis pela maioria das

variações no conjunto de dados original (Aidoo et al., 2021). O conceito e as aplicações da ACP têm sido amplamente discutidos em muitas literaturas (Johnson e Wichern 2002; Abdi e Williams, 2010), assim como pode ser utilizada para entender o comportamento dos critérios na avaliação multicriterial se utilizados posteriormente.

### 3. Resultados

A fragilidade ambiental das fazendas florestais obtida por meio do método CLP e de suas respectivas estradas estão representadas na Figura 2.

**Figura 2** - Níveis de fragilidade ambiental, em fazendas de produção florestal A e B com foco no planejamento de estradas florestais, SP, Brasil.



Fonte: Autoria própria

Ao analisar a classificação das fazendas florestais em níveis de fragilidade ambiental, percebe-se que na fazenda A há uma predominância de ocupação na classe muito baixa, abrangendo cerca de 65,25% da área total da fazenda (Figura 2A). Além disso, 0,0003% da fazenda A foi classificada como fragilidade muito alta, 1,43% como alta, 25,69% como média

e 7,63% como muito baixa. Na fazenda B, a classe de baixa fragilidade ambiental predomina, ocupando 46,79% da área total da fazenda (Figura 2B). Além disso, 0,004% da área da fazenda B foi classificada como fragilidade muito alta, 13,56% como alta, 38,13% como média e 1,51% como muito baixa.

Considerando apenas as estradas florestais presentes nas fazendas, pode-se constatar que na fazenda A há predominância da classe de fragilidade ambiental baixa, abrangendo 63,83% da área total, além disso, 0,005% das estradas foram classificadas com fragilidade muito alta, 1,46% como alta, 24,04% como média e 10,66% como muito baixa (Figura 2A). Por sua vez, na fazenda B também prevaleceu a fragilidade ambiental baixa, abrangendo 53,93% da área, sendo que 0,096% das estradas presentes foram classificadas como muito alta, 13,40% como alta, 26,86% como média e 5,72% como muito baixa (Figura 2B).

Avaliando a contribuição dos critérios classificados em cada classe de fragilidade ambiental em classes de fragilidade ambiental, é possível observar seus valores percentuais de área para cada fazenda (Tabela 1).

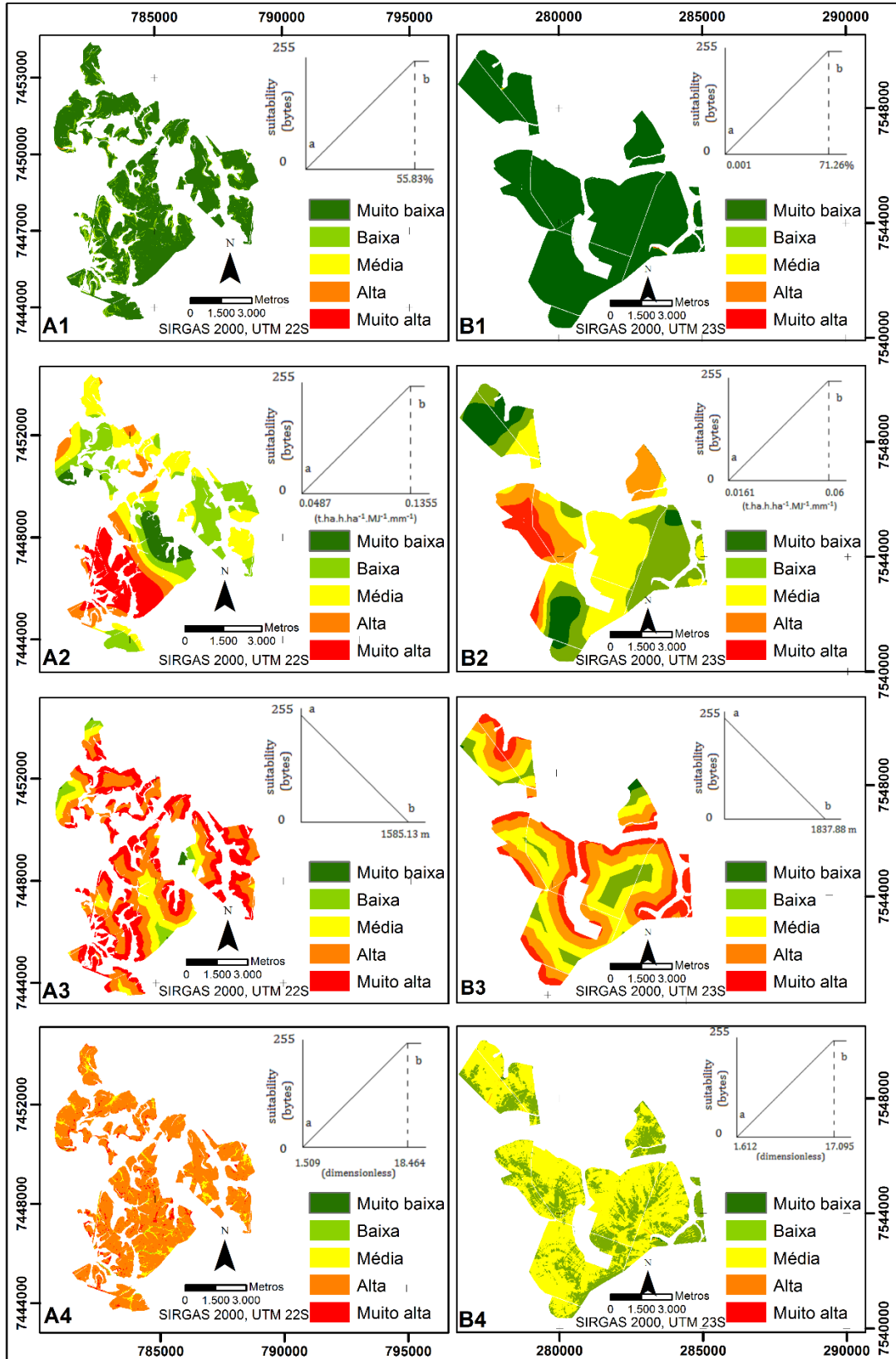
**Tabela 1** - Classes de fragilidade ambiental para cada critério, das fazendas de produção florestal (A) e (B), SP, Brasil.

	Critérios	Fragilidade ambiental (%)				
		Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Fazenda A	Declividade	89,01	10,24	0,66	0,07	0,03
	Erodibilidade	8,33	30,92	29,61	12,40	18,74
	DRH	0,54	3,54	14,07	39,65	42,20
	ITU	0,01	0,34	6,20	89,27	4,18
Fazenda B	Declividade	99,83	0,10	0,04	0,02	0,02
	Erodibilidade	13,69	29,25	34,42	15,30	7,34
	DRH	0,48	9,97	32,18	36,26	21,10
	ITU	0,17	32,88	66,82	0,14	0,001

Fonte: Autoria própria

A Figura 3 apresenta os critérios considerados essenciais para definir a fragilidade ambiental das fazendas com foco no planejamento de estradas florestais, após sua normalização e classificação em classes pré-definidas para o mapa final.

**Figura 3** - Fragilidade ambiental dos mapas de critérios e funções utilizados para sua normalização na escala comum (0-255bytes): (1) declividade, (2) erodibilidade, (3) DRH e (4) ITU, das fazendas de produção florestal (A) e (B), SP, Brasil.



Fonte: Autoria própria

A ACP realizada para a fazenda A resultou na explicação de 38,54% das variações no eixo 1 (PC1) e 25,45% da variação no eixo 2 (PC2). Já para a fazenda B, a ACP explicou 35,74% da variação no eixo 1 (PC1) e 28,63% da variação no eixo 2 (PC2). Em outras palavras, as variáveis ambientais consideradas como critérios apresentaram uma acurácia de aproximadamente 64% nos resultados obtidos para cada uma das fazendas, conforme apresentado na Tabela 2.

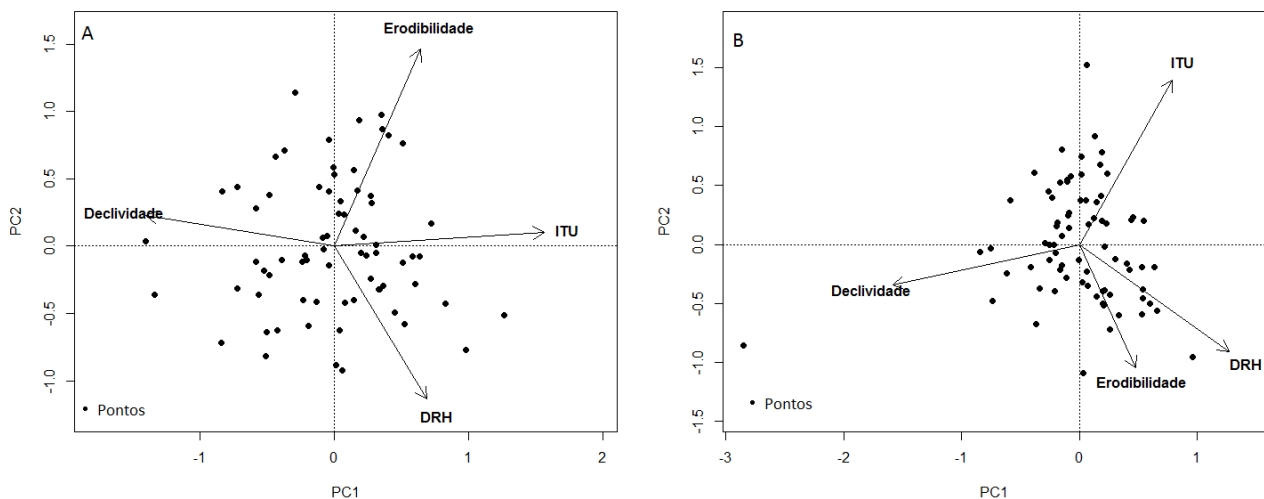
**Tabela 2** - Autovetores da matriz de correlação dos componentes principais (PC) para os critérios das fazendas de produção florestal (A) e (B), SP, Brasil.

Critérios	Fazenda A		Fazenda B	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Declividade	-0.78	0.11	-0.85	-0.19
DRH	0.29	-0.75	0.68	-0.49
Erodibilidade	0.41	0.67	0.25	-0.56
ITU	0.86	0.04	0.42	0.75

Fonte: Autoria própria

Os critérios que mais representaram o eixo 1 da ACP realizada para a fazenda A foram o ITU com 86% e a declividade com 78%, o que demonstra uma relação inversamente proporcional entre eles. Já o eixo 2 foi mais representado pelo DRH com 75% e a erodibilidade com 67%, também apresentando uma relação inversamente proporcional. Esses resultados podem ser observados na Figura 4A e são apresentados na Tabela 2.

**Figura 4** - Componentes principais para os critérios das fazendas de produção florestal (A) e (B), SP, Brasil.



Fonte: Autoria própria

Na fazenda B, a maior representação no eixo 1 foi do critério declividade com 85% e 68% do critério DRH, já no eixo 2 o critério ITU foi mais representativo com 75% (Tabela 2), ainda se observa que DRH e erodibilidade possuem correlação próxima, ou seja, quando um aumenta o outro também aumenta (Figura 4B). Destaca-se que declividade, DRH e erodibilidade, são inversos ao critério ITU.

#### 4. Discussão

As áreas de fragilidade ambiental (Figura 2) representam os critérios definidos neste estudo. A combinação dos critérios, por meio do método CLP, indica que fazenda A apresentou 17,87% da sua área associada com os níveis de muito alta e alta fragilidade ambiental, principalmente nas áreas centrais da fazenda, o que pode ser explicado pelos valores altos de fragilidade dos critérios erodibilidade, DRH e ITU (Tabela 1) nestas regiões. Na fazenda B 27,21% da área foi classificada como classes alta e muito alta (Figura 2), o que se deve a distribuição dos valores de DRH e erodibilidade (Tabela 1) nestas classes.

Quando se considera as estradas florestais existentes nas fazendas, estas apresentaram maiores valores na classe média fragilidade tanto para a fazenda A, quanto para a fazenda B. Os valores de 60,12% para a fazenda A e 44,21% para fazenda B nas classes médias de fragilidade ambiental, indica que é necessário manutenções e talvez alocação das estradas para as áreas que apresentaram menor fragilidade ambiental, ou seja, áreas com menores valores de declividade, erodibilidade, ITU e mais distantes da rede hidrográfica, para não virem se tornar problemas futuros. Portanto, a análise dos critérios separadamente, para uma melhor gestão de técnicas adequadas à conservação do solo se torna importante.

Com base na literatura relacionada às estradas florestais, a declividade é considerada um critério importante que permite identificar regiões da paisagem associadas à fragilidade ambiental quando não há uso adequado do solo. As principais estradas e localização em regiões montanhosas estão entre os fatores mais sensíveis, e a falta de atenção a esta questão pode resultar em danos irreversíveis (Rees e Ali, 2012), e conforme os resultados encontrados, nenhuma das duas fazendas apresentaram valores elevados de fragilidade ambiental para o critério declividade (0,03% - fazenda A e 0,02% - fazenda B, Tabela 1), principalmente porque essas áreas foram identificadas distantes da APP e RL (Figura 1 e 3).

Quando se considera os maquinários que transitam na área, de acordo com Laschi et al. (2016), as características de construção devem diferir, dependendo do tipo de máquinas que se espera que funcionem em diferentes ramais de estrada. Em particular, largura, inclinação e raio de curvatura são os elementos mais importantes para estradas florestais que podem limitar a

trafegabilidade dos veículos (ou seja, dimensões e carga útil dos veículos), além de obras de arte.

A declividade é um fator crucial na estimativa de acessibilidade, em áreas montanhosas, influenciando fortemente a acessibilidade (Cavalli e Grigolato, 2010) e afetando o sistema de exploração madeireira e os custos das operações florestais (Hippoliti, 1997; Laschi et al., 2016). Embora tratores de arraste de toras (Skidder) sejam tolerantes às maiores inclinações, caminhões carregados suportam declividade de até 9% (5,14 graus) desde que o leito da estrada seja bem estruturado (Barbosa et al., 2017).

Considerando as estradas existentes nas duas fazendas com até 9% de declividade, o estudo demonstrou que 69,2% das áreas das fazendas A e 96,4% da fazenda B, são aptas para suportar maquinários pesados, o que exige mais atenção no planejamento de estradas florestais da fazenda A, pois possui uma malha viária maior que a fazenda B (Figura 1; 3,9% e 1,9% de ocupação da área, respectivamente), representando uma maior densidade.

A densidade de estradas florestais de acordo com Machado (2013) envolve os custos de colheita florestal, bem como da construção e manutenção das estradas, portanto, além de se ter estradas florestais alocadas em locais com baixa fragilidade ambiental, uma rede menos densa pode reduzir os custos de construção, manutenção e transporte.

A declividade também influencia os processos erosivos, principalmente a erosão hídrica do solo, que aumenta e promove o aumento do volume e da velocidade do escoamento e diminui a infiltração de água no solo. Assim, quanto maior a declividade da região, maior o potencial de escoamento superficial e perda de solo (Cogo et al., 2003; Gonçalves et al., 2011; El kateb et al., 2013), ou seja, maior a fragilidade ambiental para estrada florestal, portanto, é importante analisar os critérios referentes a água e solo com a declividade.

Quando se pensa em estradas florestais, por serem em sua maioria não pavimentadas, estão expostas ao aumento do escoamento superficial e à ocorrência de erosão do solo, tornando o mapa de solo um fator essencial para o planejamento ambiental. Portanto, de acordo com Papierowska et al. (2020), essas estradas requerem constantemente reparos e manutenções, que estão associadas ao alto custo, principalmente de terraplenagem.

A hidrorrepelência do solo causa atraso na infiltração da água no solo, afetando o escoamento superficial, levando à destruição da camada ativa da estrada. Este fenômeno é bem reconhecido em solos de habitats florestais, mas pouco investigado em termos de solos que constituem estradas (Papierowska et al., 2020). A erodibilidade é um critério ligado às propriedades do solo, sendo afetada pelo clima, topografia, tipo de uso do solo e geomorfologia (Madenoglu et al., 2020).

Como observado na Tabela 1 e Figura 3, as duas fazendas apresentam os níveis de fragilidade ambiental de erodibilidade bem distribuídos por toda área, o que implica haver valores altos de fragilidade ambiental para este critério também próximos a APP e RL. Esses valores em classes, permitem selecionar os locais com maior redução na estabilidade dos agregados do solo, ou seja, aumento na erodibilidade do solo, conforme citado por Parsakhoo et al. (2016), sendo fatores críticos para a erodibilidade de estradas florestais, principalmente em áreas restritas.

Quanto a DRH, na fazenda A 81,85% da área foi classificada em alta e muito alta fragilidade (Tabela 1), e na fazenda B foi igual a 57,36% (Tabela 1), sendo esses valores preocupantes, pois são áreas próximas à hidrografia, ou seja, áreas restritas como APP e RL (Figura 1) e se observa que nas duas fazendas se tem estradas florestais próximas a essas áreas, necessitando atenção da sua manutenção e até alocação/relocação. Como o acúmulo de fluxo de água na estrada florestal, pode influenciar diretamente no processo de erosão do solo, portanto, é essencial reduzir a conectividade entre as estradas florestais (ou trilhas de arraste) e os rios para minimizar o transporte de sedimentos para a rede hidrográfica (Kastridis, 2020), sobretudo em áreas restritas.

Para entender a relação entre os critérios relevo, hidrografia e solo, o ITU traz mais uma contribuição, pois é possível a identificação das áreas hidrologicamente sensíveis, e está intimamente ligada a topografia, ao tipo e cobertura do solo. Na fazenda A, 93,44% da área é classificada em alta e muito alta fragilidade ambiental, enquanto na fazenda B, os maiores valores são encontrados na classe de média fragilidade (Tabela 1, 66,82%). Essa diferença pode ser explicada pela distribuição dos tipos de solos, que na fazenda A 47,47% da área é coberta por solos do tipo argissolo, enquanto na fazenda B, 89,6% da área é coberta por solos do tipo latossolo.

Os latossolos de acordo com Santos et al. (2018), possuem semelhante teor de argila no perfil, ou seja, apresentam textura uniforme ao longo do perfil e possuem quantidades semelhantes de macro e microporos, por isso a quebra de capilaridade entre os horizontes A e B é reduzida. Já os argissolos possuem teor de argila bem mais elevado no horizonte B em relação ao horizonte A, sendo considerados solos com gradiente textural, ou seja, a água rapidamente se infiltra no horizonte A, mas é barrada por uma menor taxa de percolação no horizonte B, devido à presença de argila que contribui para a resistência do solo, inclusive são mais propensos à erosão (Le Bissonnais, 1996; Imhoff et al., 2002; Wu et al., 2017). Assim, ela passa a se acumular no horizonte A, pois a água escoar sobre a camada compactada, erodindo o

subsolo e provocando o colapso do horizonte superficial e a tornando mais úmida, acarretando maiores valores de ITU.

Ainda, se pode inferir que os níveis de erodibilidade concentrados em sua maior parte em classes muito baixa, baixa e média fragilidade (Tabela 1), podem estar correlacionados com as áreas de média a alta fragilidade do critério ITU, devido à existência de cobertura vegetal que aumenta a infiltração, reduzindo o escoamento superficial, portanto, retardando significativamente a ocorrência de erosão do solo, segundo Zhou et al. (2008).

Quanto a ACP, pode-se inferir que para a fazenda A, a declividade e ITU são inversamente proporcionais (PC1), o que pode ser comprovado pelos valores em classes (Tabela 1), ou seja, há concentração de valores em classes de maior fragilidade de ITU que em classes de declividade. Isso se explica, pois a declividade influencia fortemente os processos de erosão, principalmente a erosão hídrica do solo, uma vez que seu aumento promove o aumento no volume e na velocidade da enxurrada diminuindo a infiltração de água no solo (El Kateb et al., 2013), ou seja, em áreas mais declivosas, se tem menos áreas úmidas.

Na fazenda B, se tem a declividade como o critério mais influente no PC1. O fato de DRH e erodibilidade possuírem correlação próxima no PC2, está ligada a severidade dos impactos como erosão e escoamento superficial estarem inter-relacionadas ao gradiente da declividade do terreno (Safari et al., 2016), ou seja, quanto maior a declividade, maiores são os valores de erodibilidade.

Ressalta-se que a intensidade da erodibilidade do solo, é influenciada também pelas características das chuvas, pela cobertura vegetal e pelo manejo, do que pelas próprias propriedades do solo, sendo considerada um fator-chave para erosão do solo em estradas florestais, como citado por Parsakhoo et al. (2016), ainda, a erosão superficial do solo aumenta, sobretudo, o escoamento superficial (Froehlich, 1995; Ziegler et al., 2000).

Os valores de ACP corroboram o comportamento dos critérios na paisagem e ainda esta análise pode auxiliar no ranqueamento de importância dos critérios, se utilizadas no processo hierárquico da AMC. Pode-se então inferir a partir dos critérios representativos de solo, hidrografia e declividade, como sendo componentes do projeto de estradas, assim como destacado por Meignan et al. (2015), principalmente ao avaliar a sua viabilidade, custos de construção e manutenção.

Os resultados aqui apresentados destacam a importância da conservação das estradas localizadas principalmente ao longo dos rios e em áreas não declivosas que apresentam fragilidade ambiental, permitindo assim proteger os solos e regiões mais sensíveis. Ressalta-se que conhecer a fragilidade ambiental das fazendas de plantio comercial, se torna essencial não

somente para o planejamento de estradas florestais, mas também de outras atividades florestais, o que pode ser utilizada por gestores para mitigar os impactos negativos que as atividades florestais podem acarretar na paisagem. Dessa forma, os critérios produziram um mapa de fragilidade ambiental representando as características naturais da área de estudo.

## 5. Conclusão

Com a avaliação da fragilidade ambiental, é possível compreender o comportamento dos critérios ambientais, servindo de base para o planejamento florestal, além disso, os resultados podem auxiliar nos mecanismos de sustentação do ecossistema.

A espacialização das áreas de fragilidade ambiental, mostrou coerência com o que foi definido pelo objetivo do estudo. Desta forma, os quatro critérios selecionados representam as características críticas das fazendas, ressaltando a sua fragilidade para o planejamento florestal, sobretudo de estradas florestais.

A partir da ACP, foi possível aferir as variáveis que mais descreveram a criticidade ambiental das fazendas e os problemas das estradas florestais, como encontrados na literatura. Assim como a análise dos critérios separadamente pode auxiliar outros estudos, especialmente com o objetivo para a alocação de estradas florestais.

Pode-se concluir ainda, que é possível utilizar o método CLP no mapeamento ambiental de fragilidade de fazendas florestais comerciais, considerando aspectos críticos da paisagem, de modo a ter tanto conservação do solo quanto da água.

## Referências

- Abdi, E., Majnounian, B., Darvishsefat, A., Mashayekhi, Z., Sessions, J. A GIS-MCE based model for forest road planning. **Journal of Forest Science**, v.55, n.4, p. 171–176, 2009. doi:10.17221/52/2008-jfs
- Abdi, H., Williams, L.J. Principal component analysis. **WIREs Comp. Stat**, v. 2, p. 433–459, 2010.
- Ahammad, R., Stacey, N., Sunderland, T. Analysis of forest-related policies for supporting ecosystem services-based forest management in Bangladesh. **Ecosystem Services**, v.48, 101235, 2021. doi:10.1016/j.ecoser.2020.101235
- Aidoo, E. N., Appiah, S. K., Awashie, G. E., Boateng, A., Darko, G. Geographically weighted principal component analysis for characterising the spatial heterogeneity and connectivity of

soil heavy metals in Kumasi, Ghana. **Heliyon**, v.7, e08039, 2021. doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08039

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507

Angelstam, P., Manton, M., Yamelnyets, T., Sørensen, O. J., & Kondrateva (Stepanova), S. V. Landscape Approach towards Integrated Conservation and Use of Primeval Forests: The Transboundary Kovda River Catchment in Russia and Finland. **Land**, v. 9, n.5, p. 1-27, 2020. doi: 10.3390/land9050144

Anjinho, P. da S., Barbosa, M. A. G. A., Costa, C. W., Mauad, F. F. Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study. **Land Use Policy**, v.100, 104946, 2021. doi: 10.1016/j.landusepol.2020.104946

Arriagada, L., Rojas, O., Arumí, J. L., Munizaga, J., Rojas, C., Farias, L., Vega, C. A new method to evaluate the vulnerability of watersheds facing several stressors: a case study in mediterranean Chile. **Sci. Total Environ**, v. 651, p. 1517-1533, 2019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.237.

Barbosa, R. P., Rodrigues, L. C. E., Gorgens, E. B. Multicriteria optimization for log extraction in Amazon based on airborne laser scanning data. **Sci. For.**, v. 45, n. 115, p. 541-550, 2017. doi: 10.18671/scifor.v45n115.11

Begotti, R. A., Pacífico, E. dos S., Ferraz, S. F. de B., Galetti, M. Landscape context of plantation forests in the conservation of tropical mammals. **Journal for Nature Conservation**, v. 41, p. 97–105, 2018. doi:10.1016/j.jnc.2017.11.009

Brasil. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis no 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis no 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm). Acesso em: 12 janeiro de 2023.

Çalışkan, E. Planning of environmentally sound forest road route using GIS & S-MCDM. **Šumarski List**, v.141, n.11-12, p.591–591, 2017. doi:10.31298/sl.141.11-12.6

Caniani, D., Lioi, D., Mancini, I., Masi, S. Hierarchical classification of groundwater pollution risk of contaminated sites using fuzzy logic: a case study in the Basilicata Region (Italy). **Water**, v. 7, n.12, p.2013–2036, 2015. doi: 10.3390/w7052013.

Caniani, D., Labella, A., Lioi, D. S., Mancini, I. M., Masi, S. Habitat ecological integrity and environmental impact assessment of anthropic activities: a GIS-based fuzzy logic model for sites of high biodiversity conservation interest. **Ecol. Indic**, v. 67, p.238–249, 2016. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.02.038.

Cavalli, R., Grigolato, S. Influence of characteristics and extension of a forest road network on the supply cost of forest woodchips. **Journal of Forest Research**, v.15, n.3, p. 202–209, 2010. doi:10.1007/s10310-009-0170-4

Climate-data.org. Clima: Bofete e Mogi Guaçu. Disponível em: <http://pt.climate-data.org/location>. Acesso em 3 de janeiro de 2022.

Cogo, N. P, Levien, R, Schwarz, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 743 - 753, 2003. doi: 10.1590/S0100-06832003000400019

Cruz, B. B. , Manfré, L. A., Ricci, D. S., Brunoro, D., Appolinario Jr, L., Quintanilha, J.A. Environmental fragility framework for water supply systems: a case study in the Paulista Macro Metropolis area (SE Brazil). **Environ. Earth Sci.**, v.76, n. 12, p. 1-13 (441), 2017. doi: 10.1007/s12665-017-6778-3.

Daniel, T.C., Schroeder, H. Scenic beauty estimation model: predicting perceived beauty of forest landscapes. *In*: Elsner, Gary H., and Richard C. Smardon, Technical coordinators. Proceedings of our national landscape: a conference on applied techniques for analysis and management of the visual resource [Incline Village, Nev., April 23-25, 1979]. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-35. Berkeley, C.A. Pacific Southwest Forest and Range Exp. Stn., Forest Service, U.S. Department of Agriculture: p. 514–523, 1979.

El Kateb, H., Zhang, H., Zhang, P., Mosandl, R. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: a field experiment in Southern Shaanxi Province, China. **Catena**, v.105, p.1–10, 2013. doi: 10.1016/j.catena.2012. 12.012.

Ewald, K. C. The neglect of aesthetics in landscape planning in Switzerland, **Land Urban Plan.**, v.54, n. 1-4, p. 255-266, 2001. doi: 10.1016/S0169-2046(01)00140-2.

Fonseca, C. R., Ganade, G., Baldissera, R., Becker, C. G., Boelter, C. R., Brescovit, A. D., Campos, L. M., Fleck, T. Fonseca, V. S., Hartz, S. M., Joner, F., Käffer, M. I., Leal-Zanchet, A. M., Marcelli, M. P., Mesquita, A. S., Mondin, C. A., Paz, C. P., Petry, M. V., Piovensan, F. N., Putzke, J. Stranz, A., Vergara, M., Vieira, E. M. Towards an ecologically-sustainable forestry in the Atlantic Forest. **Biological Conservation**, v.142, n.6, p. 1209–1219, 2009. doi:10.1016/j.biocon.2009.02.017

Forkman, J., Josse, J., Piepho, H. P. Hypothesis tests for principal component analysis when variables are standardized. **J. Agric. Biol. Environ. Stat**, v.24, p.289–308, 2019.

França, L. C. de J., Júnior, F. W. A., Silva, C. S. J., Monti, C. A. U., Ferreira, T. C., Santana, C. J. de O., Gomide, L. R. Forest landscape planning and management: A state-of-the-art review, **Trees, Forests and People**, v. 8, 100275, 2022. doi: 10.1016/j.tfp.2022.100275.

Froehlich, W. Sediment dynamics in the Polish Flysch Carpathians. In: Sediment and Water Quality in River Catchments, **Wiley & Sons**, p. 453-461, 1995.

Geneletti, D. Biodiversity impact assessment of roads: an approach based on ecosystem rarity. **Environmental Impact Assessment Review**, v.23, n.3, p. 343-365, 2003. doi: 10.1016/S0195-9255 (02)00099-9.

Geneletti, D. Some common shortcomings in the treatment of impacts of linear infrastructures on natural habitat. **Environ. Impact Assess. Ver**, v.26, n.3, p. 257-267, 2006. doi: 10.1016/j.eiar.2005.10.003

Gonçalves, G. G. G., Daniel, O., Comunello, E., Vitorino, A. C. T., Arai, F. K. Determinação da fragilidade ambiental de bacias hidrográficas. **Floresta**, v. 41, n. 4, p. 797 – 808, 2011. doi: 10.5380/rf.v41i4.25344

Heilmayr, R. Conservation through intensification? The effects of plantations on natural forests. **Ecological Economics**, v.105, p.204–210, 2014. doi:10.1016/j.ecolecon.2014.06.008

Hippoliti, G. **Appunti di Meccanizzazione Forestale**; Società Editrice Fiorentina: Firenze, Italy, 1997, 320 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2022). Biomes of Brazil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/15842-biomas.html>. Acesso em 28 de setembro de 2022.

Imhoff, S., Pires da Silva, A., Dexter, A. Factors contributing to the tensile strength and friability of oxisols. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.66, n.5, p.1656–1661, 2002. doi: 10.2136/sssaj2002.1656.

Jaafari, A., Najafi, A., Rezaeian, J., Sattarian, A. Modeling erosion and sediment delivery from unpaved roads in the north mountainous forest of Iran. **GEM—Int.J. Geomath.** v. 6, n. 2, p. 343–356, 2014.

Jaafari, A., Najafi, A., Rezaeian, J., Sattarian, A. Modeling erosion and sediment delivery from unpaved roads in the north mountainous forest of Iran, **Int J Geomath**, v. 6, p. 343, 2015. doi: 10.1007/s13137-014-0062-4

Jack, S. B., Long, J. N. Linkages between silviculture and ecology: an analysis of density management diagrams. **Forest Ecology and Management**, v.86, n.1-3, p.205–220, 1996. doi:10.1016/s0378-1127(96)03770-x

Jesiya, N. P., Gopinath, G. A customized fuzzyAHP-GIS based DRASTIC-L model for intrinsic groundwater vulnerability assessment of urban and peri urban phreatic aquifer clusters. **Groundw. Sustain. Dev.**, v. 8, p. 654-666, 2019. doi: 10.1016/j.gsd.2019.03.005.

Johnson, R. A., Wichern, D.W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002, 800 p.

Kastridis, A. Impact of Forest Roads on Hydrological Processes. **Forests**, v.11, 1201, 2020. doi: 10.3390/f11111201

Kaya, A. , Bettinger, P., Boston, K., Akbulut, R., Ucar, Z., Siry, J., Cieszewski, C. Optimisation in Forest Management. **Current Forestry Reports**, v.2, n.1, p. 1–17, 2016. doi:10.1007/s40725-016-0027-y

Kazama, V. S., Corte, A. P. D., Robert, R. C. G., Sanquetta, C. R., Arce, J. E., Oliveira-Nascimento, K. A., DeArmond, D. Global review on forest road optimization planning: Support for sustainable forest management in Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 492, 119159, 2021. doi:10.1016/j.foreco.2021.119159

Laschi, A., Neri, F., Brachetti Montorselli, N., Marchi, E. A methodological approach exploiting modern techniques for forest road network planning. **Croat. J. For.Eng. J. Theory Appl. For. Eng.** v.37, n.2, p.319–331, 2016.

Le Bissonnais, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustibility: I. Theory and methodology. **Eur. J. Soil Sci.** v.47, p. 425–437,1996.

Liu, C. L. C., Kuchma, O., Krutovsky, K. V. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. **Global Ecology and Conservation**, v. 15, e00419, 2018. doi:10.1016/j.gecco.2018.e00419

Liu, W. Y., Lin, C. C. Spatial forest resource planning using a cultural algorithm with problem-specific information. **Environmental Modelling & Software**, v. 71, p.126–137, 2015. doi:10.1016/j.envsoft.2015.06.002

Macedo, D. R., Hughes, R. M., Kaufmann, P. R., Callisto, M. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. **Sci. Total Environ**, v.635, p.1267–1279, 2018. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.216.

Machado, C. C. **Construção e conservação de estradas rurais e florestais**. Viçosa: UFV, 2013. 441 p.

Madenoglu, S., Atalay, F., Erpul, G. Avaliação da incerteza da erodibilidade do solo por simulação sequencial gaussiana direta (DSIM) em usos do solo semiárido. **Soil and Tillage Research**, v.204, 104731, 2020. doi: 10.1016 / j.still.2020.104731

Malczewski, J. GIS-based Multicriteria Decision Analysis: A Survey of the Literature. **Int. J. Geogr. Inf. Syst.**, v.20, n.7, p.703–726, 2006. doi: 10.1080/13658810600661508

Manfré, L. A., Da Silva, A. M., Urban, R. C., Rodgers, J. Environmental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: a study case on Ibiuna (the Southeastern Brazilian region). **Environ. Earth Sci.**, v.69, n.3, p. 947–957, 2013. doi: 10.1007/s12665-012-1979-2.

Mann, D., Agrawal, G., Joshi, P. K. Spatio-temporal forest cover dynamics along road networks in the Central Himalaya. **Ecological Engineering**, v. 127, p. 383–393, 2019. doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.12.020

Marchi, E., Chung, W., Visser, R., Abbas, D., Nordfjell, T., Mederski, P. S., McEwan, A., Brink, M., Laschi, A. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. **Science of The Total Environment**, v.634, p. 1385–1397, 2018. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.084

McEwan, A., Marchi, E., Spinelli, R., Brink, M. Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology. **Journal of Forestry Research**, v.31, n.2, p.339–351, 2019. doi: 10.1007/s11676-019-01019-3

Meignan, D., Frayret, J. M., Pesant, G. Interactive planning system for forest road location. **Journal of Heuristics**, v.21, n.6, p. 789–817, 2015. doi: 10.1007/s10732-015-9299-9

Murray, A. Route planning for harvest site access. **Canadian Journal of Forest Research**, v.28, p.1084–1087, 1998.

Nasiri, H., Yusof, M. J. M., Ali, T. A. M., Hussein, M. K. B. District flood vulnerability index: urban decision-making tool. **Int. J. Environ. Sci. Technol.**, v.6, p.2249–2258, 2018. doi: 10.1007/s13762-018-1797-5.

Newman, M. E., McLaren, K. P., Wilson, B. S. Assessing deforestation and fragmentation in a tropical moist forest over 68 years; the impact of roads and legal protection in the Cockpit Country, Jamaica. **For. Ecol. Manage.**, v.315, n.1, p.138–152, 2014. doi: 10.1016/j.foreco.2013.12.033

Norizah, K., Mohd Hasmadi, I. Developing priorities and ranking for suitable forest road: Allocation using Analytic Hierarchy Process (AHP) in peninsular Malaysia. **Sains Malaysiana**, v. 41, n. 10, p. 1177–1185, 2012.

Papierowska, E., Szatyłowicz, J., Ruta, M., Łachacz, A., Gnatowski, T., Stańczyk, T. Water repellency of soils on unpaved roads in coniferous forests. **Catena**, v.195, 104784, 2020. doi: 10.1016/j.catena.2020.104784

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. doi: e059.10.5424/fs/2016252-07815.

Pliscoff, P., Simonetti, J. A., Grez, A. A., Vergara, P. M., Barahona-Segovia, R. M. Defining corridors for movement of multiple species in a forest-plantation landscape. **Global Ecology and Conservation**, v.23, e01108, 2020. doi:10.1016/j.gecco.2020.e01108

Rees, S. W., Ali, N. Tree induced soil suction and slope stability. **Geomechanics and Geoengineering**, v.7, p.103–113, 2012. doi:10.1080/17486025.2011.631039.

Rien, V., Francis, O. O. Automation and robotics in forest harvesting operations: identifying near-term opportunities. **Croat. J. For. Eng.**, v.42, p. 13-24, 2021. doi: 10.5552/crojfe.2021.739

Safari, A., Kavian, A., Parsakhoo, A., Saleh, I., Jordán, A. Impact of different parts of skid trails on runoff and soil erosion in the Hyrcanian forest (northern Iran). **Geoderma**, v. 263, p.161-167, 2016. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.09.010.

Santos, H. G. dos, Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. dos, Oliveira, V. A. de, Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A. de, Araujo Filho, J. C. de, Oliveira, J. B. de; Cunha, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. – 5. ed., – Brasília, DF, Embrapa, 2018, 356 p.

Santos, Reis, E., Pereira, S., Santos, M. A flood susceptibility model at the national scale based on multicriteria analysis. **Sci. Total Environ**, v.667, p.325–337, 2019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.328.

Sessions, J. **Forest road operations in the Tropics**. Springer, New York., 2007, 170p.

Siqueira-Gay, J., Sonter, L.J., S´anchez, L.E. Exploring potential impacts of mining on forest loss and fragmentation within a biodiverse region of Brazil’s Northeastern Amazon. **Resour. Policy**, v. 67, 101662, 2020. doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101662.

Tavares, A., Beiroz, W., Fialho, A., Frazão, F., Macedo, R., Louzada, J., Audino, L. Eucalyptus plantations as hybrid ecosystems: Implications for species conservation in the Brazilian Atlantic forest. **Forest Ecology and Management**, v.433, p.131–139, 2019. doi: 10.1016/j.foreco.2018.10.063

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. doi:10.1016/j.ecoleng.2016.05.069

Vides-Borrell, E., Porter-Bolland, L., Ferguson, B. G., Gasselin, P., Vaca, R., Valle-Mora, J., Vandame, R. Polycultures, pastures and monocultures: Effects of land use intensity on wild bee diversity in tropical landscapes of southeastern Mexico. **Biological Conservation**, v. 236, p. 269–280, 2019. doi: 10.1016/j.biocon.2019.04.025

Villa, F., McLeod, H. Environmental vulnerability indicators for environmental planning and decision-making: guidelines and applications. **Environ. Manag.**, v.29, n.3, p.335–348, 2002. doi: 10.1007/s00267-001-0030-2.

Wu, X., Wei, Y., Wang, J., Wang, D., She, L., Wang, J., Cai, C. Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient. **Catena**, v. 156, p. 205-215, 2017. doi: 10.1016/j.catena.2017.04.017

Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., Nieminen, J. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. **Catena**, v.75, n.3, 319e325, 2008. doi: 10.1016/j.catena.2008.07.010

Ziegler, A. D., Sutherland, R. A., Giambelluca, T. W. Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. **Water Resources Research**, v.36, n.9, 2787-2791, 2000. doi: 10.1029/2000wr900137

## **CAPÍTULO 4: Elaboração de um modelo de apoio à decisão para priorização de áreas à alocação de estradas florestais**

### **Resumo**

As estradas florestais podem representar potenciais fontes de impactos ambientais negativos, portanto, é necessário pensar no seu planejamento e na sua manutenção, para poderem apoiar o manejo florestal sustentável e a provisão dos serviços ecossistêmicos. Assim, visando à definição de áreas prioritárias para alocação de estradas florestais, foram considerados aspectos da paisagem como declividade, erodibilidade do solo (fator K), distância à rede de drenagem e índice topográfico de umidade (ITU). Os critérios foram agregados por meio do método da avaliação multicriterial (AMC). Considerando a importância desses critérios, 0,06% da fazenda A foi classificada como prioridade muito alta; 31,85% alta; 53,43% média; 14,59% baixa; e 0,07% muito baixa. Na fazenda B, 0,12% da área foi classificada como prioridade muito alta; 23,19% alta; 57,82% média; 18,48% baixa; e 0,40% muito baixa. A análise de sensibilidade, por meio da análise ROC (Curva Característica de Operação do Receptor), indicou coerência entre os pesos de importância do critério, e a representação das características da paisagem, com acurácia estatisticamente significativa para ambas as fazendas, com valores iguais a 88,31% e 82,85%, respectivamente, para a fazenda A e B. Por fim, pode-se destacar que o método da Combinação Linear Ponderada da AMC, é flexível, fácil de ser implementado e, se bem executado pode trazer resultados que servirão de base para os gestores florestais realizarem um manejo florestal de forma sustentável.

Palavras-chave: combinação linear ponderada; planejamento florestal; processo hierárquico analítico; manejo florestal sustentável.

### **Abstract**

Forest roads can represent potential sources of negative environmental impacts. Then, their planning and maintenance can be considered to support sustainable forest management and the provision of ecosystem services. Therefore, to define priority areas for forest road allocation, landscape aspects such as slope, soil erodibility (K factor), distance to the hydrographic network, and topographic wetness index (TWI) were considered. The criteria were aggregated using the multicriteria evaluation (MCE) method. Considering the importance of these criteria, 0.06% of farm A was classified as very high priority, 31.85% high, 53.43%

medium, 14.59% low, and 0.07% very low. In farm B, 0.12% of the area was classified as very high priority, 23.19% high, 57.82% medium, 18.48% low, and 0.40% very low. Sensitivity analysis using ROC (Receiver Operating Characteristic) analysis indicated coherence between the criterion's importance weights and the representation of landscape features, with statistically significant accuracy for both farms, with values of 88.31% and 82.85%, respectively, for farm A and B. Finally, it can be highlighted that the Weighted Linear Combination of MCE method is flexible, easy to implement, and, if well executed, can bring results that will serve as a basis for forest managers to carry out sustainable forest management.

**Keywords:** weighted linear combination; forest planning; analytic hierarchy process; sustainable forest management.

## **1. Introdução**

As estradas florestais fornecem o principal acesso às florestas (Leung et al., 2015), sendo destinadas a conectar todos os pátios de armazenamento de madeira, proporcionando um transporte mais eficiente (Aguiar et al., 2020). São consideradas um componente essencial da silvicultura e do manejo florestal (Lotfalian et al., 2019), portanto, são essenciais como infraestrutura básica para o manejo e operações florestais (Sakai, 1987; Baskent e Keles, 2005; Krč e Begues, 2013; Yoshida et al., 2018).

Ainda, são estruturas essenciais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos (SE) (Laschi et al., 2016; Picchio et al., 2018). De acordo com Ahammad et al. (2021), o papel dos SE nas políticas de gestão de recursos naturais está ganhando popularidade globalmente como um meio de fornecer maior proteção para a conservação da biodiversidade, gestão integrada de recursos naturais e promover gestão florestal sustentável.

Destaca-se que as redes de estradas florestais também permitem o acesso a áreas remotas em caso de desastres naturais (Enache et al., 2013) e são uma infraestrutura fundamental na extinção de incêndios florestais (Hayati et al., 2012a; Laschi et al., 2016), desastres climáticos, permitindo o monitoramento de rotina e o tratamento rápido contra distúrbios naturais (Yoshida et al., 2018). Portanto, os estudos na área de planejamento e manutenção de estradas florestais têm se tornado mais importantes para o manejo florestal sustentável (MFS), devido às mudanças climáticas em todo o mundo, acelerando perturbações naturais com padrões climáticos extremos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014) e confere ao MFS o papel de sua mitigação (Álvarez-Miranda et al., 2018; Yoshida et al., 2018).

Para considerar suficientemente os impactos das mudanças climáticas e para reduzir os custos associados, é importante que todos os aspectos relacionados ao MFS sejam refletidos, e isso também deve ser considerado para a infraestrutura rodoviária florestal (Yoshida et al., 2018). É urgente revisar as metodologias e técnicas de construção e manutenção de estradas florestais, e observações contínuas são indispensáveis, assim como estudos prévios esclareceram vários fatores vitais no planejamento de estradas florestais (Yoshida et al., 2018).

Embora as estradas sejam o primeiro passo no desenvolvimento dos recursos florestais (Potocnik, 1996; Bjorklund, 2005; Turk, 2019), elas também são conhecidas por causar erosão e sedimentação (Demir et al., 2012; Makineci et al., 2015; Erdem et al., 2018; Akay et al., 2018; Turk, 2019) e por impactar adversamente a vida selvagem e os recursos hídricos, que devastam as florestas em termos de produção e outras atividades florestais significativas (Turk, 2019). A construção de estradas tem consequências ambientais prejudiciais, como diminuição da área de floresta, destruição da canalização natural, solo sedimentar e destruição da água (Egan et al., 1985; Gardner, 1997; Seyed et al., 2018).

O planejamento da rede de estradas florestais representa um dos maiores desafios na perspectiva de um MFS (Hippoliti, 1997; Çaliskan, 2013; Maesano et al., 2013; Tavankar et al., 2015; Laschi et al., 2016; Tavankar et al., 2018; Picchio et al., 2018), e a sua construção é frequentemente vista com suspeita, devido ao seu alto potencial de impacto ambiental (Laschi et al., 2019). Por conta dos impactos ambientais, o planejamento da rede de estradas florestais precisa abordar os aspectos ecológicos (Tampekis et al., 2015), ou seja, considerar várias características ambientais tais como hidrologia, topografia e características do solo local.

No entanto, lidar com tantas variáveis e restrições não é uma tarefa fácil para os planejadores e tomadores de decisão de estradas (Enache et al., 2013). Para isso, o Sistema de Informações Geográficas (SIG) com o uso de critérios múltiplos espaciais, vem sendo utilizados para o planejamento de estradas florestais (Çalışkan, 2017), e pode-se citar as técnicas de tomada de decisão, tal como a avaliação multicriterial (AMC), como uma ferramenta útil para elaborar uma área modelo (Çalışkan, 2017) para diferentes áreas.

A combinação de técnicas SIG e modelos de tomada de decisão proporcionam conveniência aos usuários na determinação das várias alternativas de critérios e objetos com estruturas múltiplas e complexas (Çalışkan, 2017). Este método proporciona a integração das informações por meio da comparação das alternativas com respeito aos critérios selecionados (Malczewski, 1999; Şener, 2004; Kesgin e Ersoy, 2006; Anavberokhai, 2008).

Destaca-se que nos últimos anos, houve um rápido aumento no interesse e pesquisa sobre os métodos multicriterial baseados em SIG (Çalışkan et al., 2019). Alguns pesquisadores

têm realizado análises de redes viárias considerando, fatores como volume de madeira, declividade, condição do solo, distância entre estradas florestais existentes, tipo de solo, geologia, hidrografia, elevação e tipo de árvore, além de fatores ambientais (Sadek et al., 1999; Hosseini e Solaymani, 2006; Jusoff, 2008; Mohammadi Samani et al., 2010; Hayati et al., 2012b; Norizah, 2012; Çalışkan, 2013; Pellegrini et al., 2013; Tampekis et al., 2015; Laschi et al., 2016; Çalışkan, 2017).

Estes estudos supracitados demonstram os avanços na utilização do SIG e dos diversos métodos de tomada de decisão, análise e otimização, evidenciando a importância da investigação em estradas florestais com diferentes variáveis e metodologias aplicadas nas diferentes florestas e níveis de planejamento (Kazama et al., 2021). Por essas razões, um *layout* de rede rodoviária bem projetado e desenvolvido deve apoiar o plano de manejo florestal para permitir a melhor manutenção e valorização da malha viária, acima de tudo para melhorar a provisão dos SE.

Neste contexto, estruturou-se o presente estudo com o objetivo principal de identificar áreas prioritárias à alocação de estradas florestais, com base na agregação dos atributos ambientais por meio da avaliação multicriterial.

## **2. Material e métodos**

### **2.1. Área de estudo**

As áreas de estudo foram duas fazendas florestais, sendo uma localizada no município de Bofete (Figura 1A) e a outra no município de Mogi-Guaçu (Figura 1B), que compõem uma das mais importantes regiões produtoras de madeira do estado de São Paulo. As fazendas pertencem a uma região do bioma Mata Atlântica e Cerrado (IBGE, 2022) e o planejamento rodoviário é fundamental para a manutenção de seus serviços ecossistêmicos.

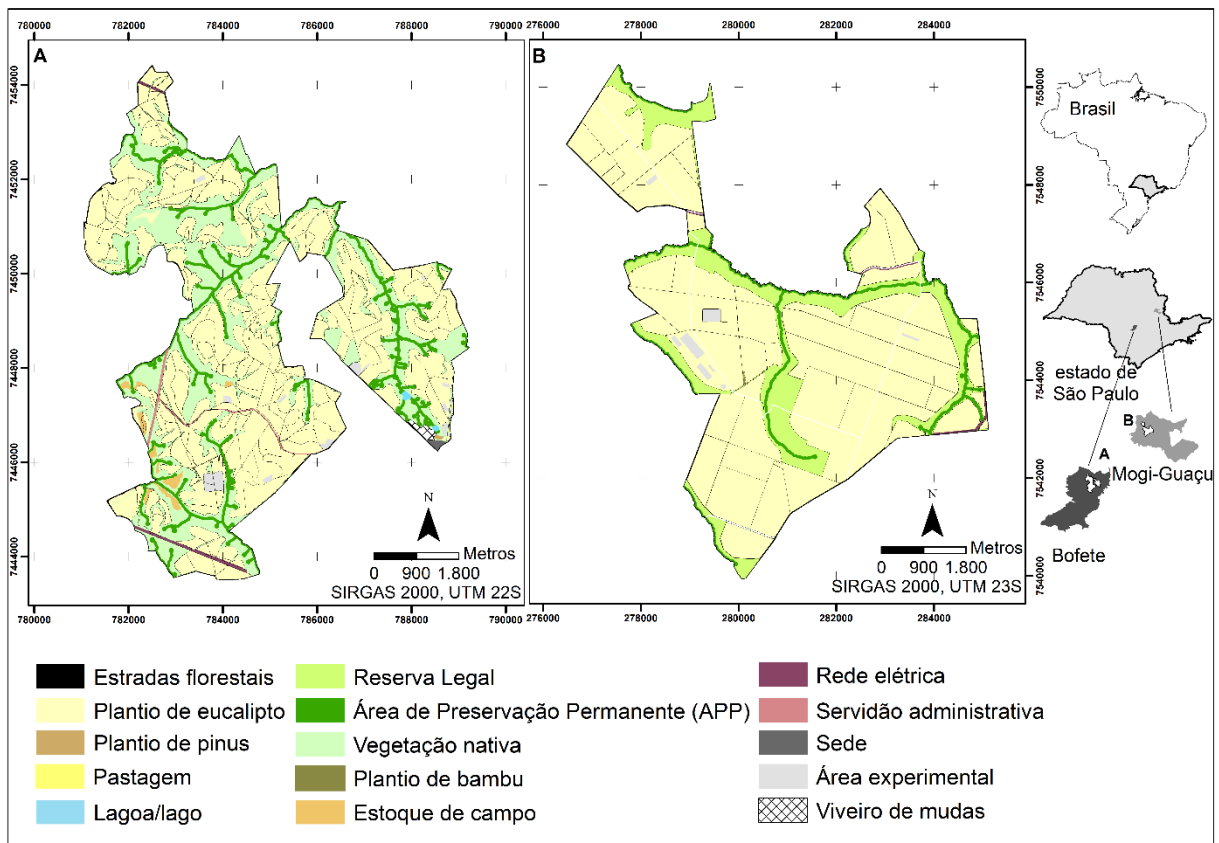
A fazenda florestal A possui aproximadamente 3.900 ha, sendo 56,8% ocupados por plantios de eucalipto, destinadas ao abastecimento da indústria de painéis. A atual rede de estradas florestais, utilizada para o transporte de madeira, está distribuída pela fazenda, ocupando 3,9% de sua área total. A fazenda florestal B possui 3.380 ha, sendo 77% ocupados por plantios de eucalipto, destinado ao abastecimento da indústria de papel e celulose. A atual rede de estradas corresponde a 1,9% da área total da fazenda.

Na fazenda A, os fragmentos de mata nativa também estão espalhados pela floresta plantada, cobrindo 27,6% da propriedade, principalmente próximo aos rios, compondo a zona ciliar, definida pela legislação brasileira, também conhecida como Área de Preservação

Permanente (APP). Já a fazenda B possui áreas de mata nativa cobrindo 19,84%, composta por APP e Reserva legal (RL) também definida pela legislação brasileira (Brasil - Lei nº 12.651/12).

A fazenda A possui outros usos do solo como estoque de campo (áreas com toras de eucalipto liberadas do plantio pós-corte), rede elétrica, viveiro de mudas, sede (área com escritórios administrativos da empresa), que totalizam 2,73% de sua área (Figura 1A). A fazenda B, também possui outros usos do solo como, áreas experimentais e áreas com plantios de bambu que chegam a quase 1% do total da área (Figura 1B).

**Figura 1** - Uso e cobertura do solo da fazenda florestal A no município de Bofete e da fazenda florestal B no município de Mogi-Guaçu, estado de São Paulo (SP), Brasil.



Fonte: base de dados das empresas florestais (2021), organização: autoria própria

Em relação ao tipo de solo levantado pelas fazendas, a fazenda A tem 47,47% da área ocupada por Argissolos; 7,75% por Latossolos; 7,24% por Neossolos e 37,54% da área apresenta uma unidade de mapeamento heterogênea composta pelos tipos de solo Cambissolo, Neossolo e Argissolo. A fazenda B possui 89,6% da área ocupada por Latossolo e 10,4% composto por Gleissolos.

## 2.2. Critérios ambientais

A estrutura do modelo conceitual para avaliar a prioridade das áreas à alocação das estradas foi elaborada a partir dos atributos ambientais representativos do solo, relevo e água. Os atributos ambientais são aqui nomeados de critérios, visto o desenvolvimento do modelo de priorização no contexto de Avaliação multicriterial.

Critérios, segundo Eastman (2012), são a base do processo de tomada de decisão e estão tradicionalmente divididos em fatores e restrições. De acordo com Boroushaki (2017), a definição dos critérios e, subsequentemente, a definição da importância relativa entre eles, necessita de cuidado. Isto porque, partindo de um conjunto de critérios, começa a estruturação do processo de tomada de decisão.

Nesse contexto, a partir da consulta da equipe técnica e gestores da empresa florestal sobre a localização e manutenção de estradas, colheita florestal, solo e planejamento ambiental, além da consulta da literatura, selecionaram-se os critérios ambientais considerados essenciais para o planejamento de estradas florestais, sendo eles erodibilidade do solo (fator K), declividade, índice topográfico de umidade (ITU) e distância à rede hidrográfica (DRH).

Os mapas básicos para produção dos critérios descritos a seguir, com resolução espacial de 5 m, foram cedidos pelas empresas, sendo eles os mapas de solos, curvas de nível, mapas de uso/cobertura do solo).

- Fator K (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1): o valor de K, relativo aos tipos de solo, foi calculado a partir da equação 1, conforme proposto por Bouyoucos (1935) e Bertoni e Lombardi Neto (1990):

$$K = \frac{\frac{(\% \text{ Areia} + \% \text{ Silte})}{\% \text{ Argila}}}{100} \quad (1)$$

Na fazenda A, as porcentagens de areia, silte e argila foram obtidas por amostras de solo a 20-40 cm de profundidade, predominantemente equivalentes ao seu horizonte B. Os dados de solo da fazenda B foram fornecidos pela empresa e os valores do fator K foram calculados com as porcentagens. Foram considerados tamanhos de partículas menores que 0,002 mm para argila, 0,002-0,053 mm para silte e 0,053-2000 mm para areia total. Para gerar este mapa utilizou-se a krigagem para interpolar os dados de solo nas duas áreas.

- Declividade e ITU: foram extraídos do Modelo Digital de Elevação (MDE), baseado nas curvas de nível (equidistância de 5 metros, escala 1:10000) pertencentes ao banco

de dados cartográfico da empresa. O MDE foi gerado pela função de interpolação do topo para raster. O pacote de *software* utilizado para extrair o ITU do MDE foi o SAGA GIS (7.1.1).

- Distância da rede hidrográfica (DRH): o DRH foi produzido a partir da distância da hidrografia existente, considerando uma drenagem juntamente com o fator limitante (topografia e fatores horizontais).

Além dos critérios, identificaram-se as áreas de restrição, aquelas onde as estradas florestais não podem ser alocadas/construídas. Referem-se às ocupadas por áreas de preservação permanente (APP), vegetação nativa, sede, viveiro, rede elétrica, lagos/lagoas, plantios de pinus, pastagem, Reserva Legal (RL), plantios de bambu, servidão administrativa, área experimental e estoque de campo. Essas áreas são, portanto, excluídas dos mapas de critérios e do mapa final posteriormente.

### 2.3. Normalização dos critérios

O método da avaliação multicriterial (AMC) combina os mapas de critérios em um mapa final requerendo a prévia normalização deles para uma escala comum, visto que originalmente estão em distintas escalas. Para isso, selecionou-se funções lineares de pertinência, baseadas na lógica difusa, representativas das relações de prioridade entre as feições do mapa e o objetivo do estudo. Definiu-se a normalização para uma escala 255 bytes.

$$x_i = \frac{R_i - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \times m \quad (2)$$

Sendo:  $x_i$  = pontuação padronizada;  $R_i$  = valor bruto a ser normalizado,  $R_{max}$  = valor máximo,  $R_{min}$  = valor mínimo,  $m$  = intervalo normalizado

Assim, aplicou-se a função linear decrescente para normalizar a declividade, fator K e ITU, garantindo que os maiores valores da escala (0-255 bytes) fossem associados aos menores valores dos respectivos mapas. Por outro lado, a função linear crescente suportou a normalização de DRH, garantindo os maiores valores associados aos locais onde se têm maiores distância aos rios.

### 2.4. Áreas prioritárias à alocação de estradas florestais

As áreas prioritárias foram obtidas por meio da agregação de critérios ambientais, utilizando-se o método de Combinação Linear Ponderada (CLP) desenvolvida por Voogd

(1983) (Eq. 3), um método tradicional de AMC. De acordo com Eastman (2012) este método agrega os mapas de critérios e considera sua importância relativa para o processo de tomada de decisão

$$S = \sum_{i=1}^n w_i X_i * \prod_{j=1}^K c_j \quad (3)$$

Sendo: S: valor da pontuação final;  $w_i$  (denominados pesos fatoriais): peso do parâmetro fator  $i$  (com  $i=1, \dots, n$ );  $n$ : número de critérios;  $x_j$ : valor normalizado para o mesmo fator;  $c_j$ : score (0 ou 255) do parâmetro de exclusão (com  $j=1, \dots, k$ ); e  $k$ : número de parâmetros de exclusão.

Primeiro, a partir da literatura classificou-se a ordem de importância dos critérios, e depois definiu-se sua importância, a qual é representada por seu peso de fator (pf). Definiu-se pf no contexto do processo hierárquico analítico (AHP, do inglês *Analytic Hierarchy Process*), a partir do método de comparação pareada, considerando uma escala de 9 pontos (Saaty, 1980).

De acordo com Saaty, o valor 9 implica que um critério é extremamente mais importante que o outro e  $1/9$  que um critério é extremamente menos importante que o outro (Eastman, 2012). Os demais valores contidos neste intervalo indicam diferentes graus de importância para cada critério, variando entre muito importante, importante, moderadamente menos importante ou mais importante, enquanto o valor 1 indica uma importância equivalente.

A Taxa de Consistência (TC) avalia a matriz, indicando a probabilidade de que as comparações pareadas tem ocorridas aleatoriamente Saaty (1980). Segundo o autor, valores de TC inferiores a 0,10 indicam boa consistência da matriz, desta forma, quando o TC excede esse valor, a importância das variáveis na comparação pareada deve ser reavaliada.

O mapa final de priorização das áreas para alocação de estradas florestais foi reclassificado em cinco classes de prioridade iguais, sendo elas: muito alta, alta, média, baixa e muito baixa, com homogeneidade de frequência e distribuição de pixels, conforme proposto por Vettorazzi e Valente (2016). Foi realizada a sobreposição do mapa de uso com o objetivo de extrair as estradas florestais existentes nas fazendas do mapa final de priorização, visando compreender a classificação atual delas.

## 2.5. Validação do modelo de priorização de áreas

Validou-se o modelo de priorização de áreas a partir da análise estatística ROC (Característica de Operação do Receptor, do inglês *Receiver Operating Characteristic*) no ambiente do programa estatístico R Core Team.

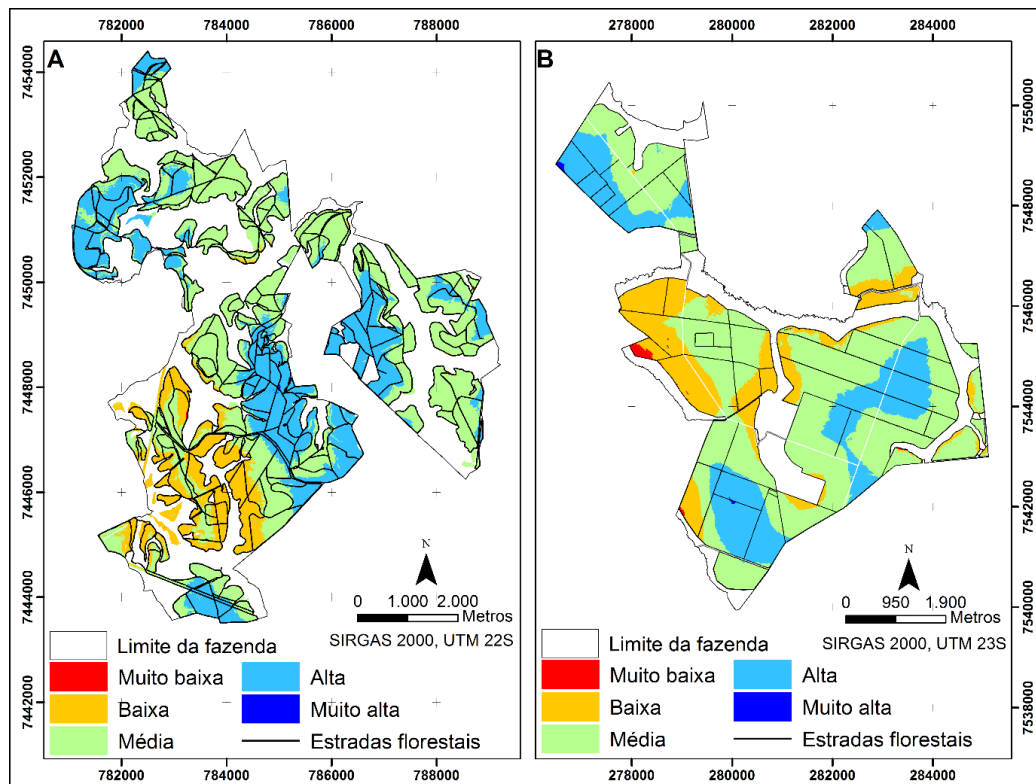
A área sob a curva (AUC, do inglês *Area Under Curve*) é um índice sintético calculado para curvas ROC que determina a probabilidade de um evento classificado como positivo pelo teste ser realmente positivo, considerando todos os valores possíveis do teste (Wang et al., 2019). A AUC foi utilizada para avaliar o desempenho geral do método, ou seja, para medir a capacidade da classificação das áreas prioritárias para alocação de estradas florestais ter sido correta.

A relação quantitativo-qualitativa que existe entre a AUC e a taxa de previsão é dada da seguinte forma: insatisfatório (0,5 – 0,6), satisfatório (0,6 – 0,7), bom (0,7 – 0,8), muito bom (0,8–0,9) e excelente (0,9 – 1), de acordo com os autores Falah et al. (2019); Kanani-Sadat et al. (2019) e; Chukwuma et al. (2021).

### 3. Resultados

A Figura 2 mostrou o nível de prioridade atribuído à alocação de estradas florestais para as duas fazendas de produção florestal, utilizando o método CLP.

**Figura 2** - Prioridade de alocação de estradas florestais, em fazendas de produção florestal A e B, SP, Brasil.



Fonte: Autoria própria.

Segundo esses mapas, 0,06% da fazenda A foi classificada como prioridade muito alta; 31,85% alta; 53,43% média; 14,59% baixa; e 0,07% muito baixa (Figura 2A). Na fazenda B, 0,12% da área foi classificada como prioridade muito alta; 23,19% alta; 57,82% média; 18,48% baixa; e 0,40% muito baixa (Figura 2B).

A soma desses percentuais corresponde à área de 2.481,85 ha da fazenda A e 2.700,19 ha da fazenda B, que se refere à área total da fazenda, excluindo suas restrições (ou seja, onde não haverá alocação de estradas), ou seja, a APP, vegetação nativa, sede, viveiro de plantas, rede elétrica, plantio de bambu, RL e lagos/lagoas.

Relativamente ao nível de prioridade associado às estradas existentes (total de 152,05 ha), 0,36% da área A está classificada com prioridade muito alta; 29,85% alta; 53,57% média; 15,80% baixa; e 0,42% muito baixa (Figura 2A). Na fazenda B, 1,09% das estradas existentes (total de 64,22 ha) foram classificadas como prioridade muito alta; 22,45% alta; 48,29% média; 26,38% baixa; e 1,79% muito baixa (Figura 2B).

A escolha dos critérios utilizados para o método, é apresentada de forma sucinta na Tabela 1.

**Tabela 1** - Critérios para priorizar áreas à alocação de estradas florestais, de fazendas de produção florestal (A) e (B), SP, Brasil.

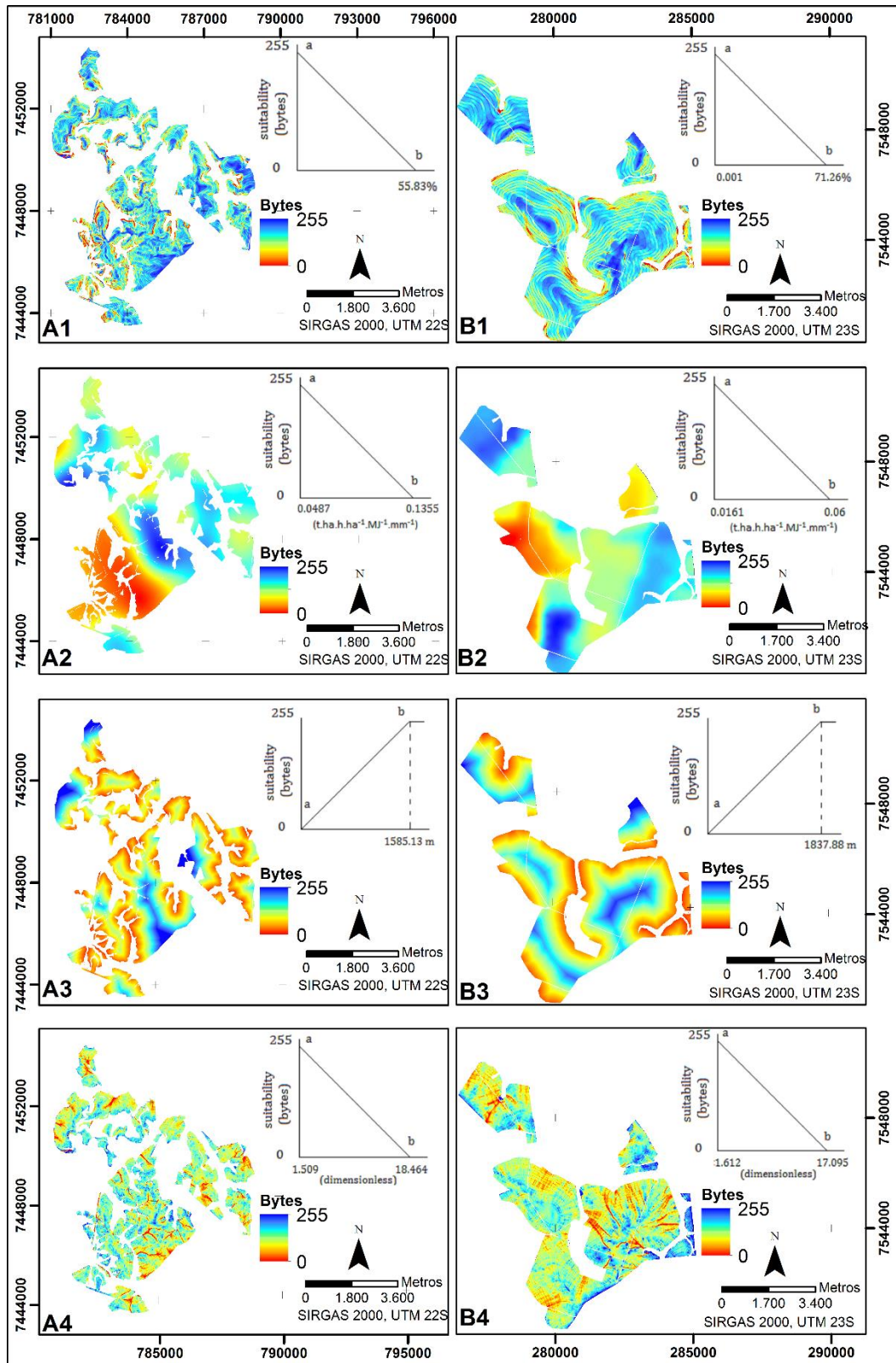
<b>Critérios</b>	<b>Justificativa</b>
Declividade (1)	Há muito se reconhece que as estradas florestais, especialmente em terrenos íngremes e montanhosos, podem resultar em impactos adversos ao meio ambiente, acelerando a erosão e o carregamento de sedimentos e perturbando as características de drenagem das bacias hidrográficas. (Megahan, 1987; Furniss et al., 1991; Ziegler et al., 2000; Jaafari et al., 2015). Assim, áreas com menores valores de declividade estão relacionadas às regiões menos sensíveis da fazenda, em termos de erosão e escoamento superficial. Essas regiões foram classificadas, por meio deste critério, aos maiores níveis de prioridade.
Erodibilidade (2)	De acordo com Parsakhoo et al. (2016), a redução da estabilidade de agregados e o aumento da erodibilidade (fator K) são citados como fatores-chave para a erosão do solo de estradas florestais. Assim, áreas com baixos valores de erosão estão relacionadas às regiões menos sensíveis da

Critérios	Justificativa
	fazenda. Essas regiões foram classificadas, por meio deste critério, aos níveis de maior prioridade.
DRH (3)	A prioridade de gestão, a fim de minimizar o impacto das estradas florestais no fluxo superficial, é a redução significativa no escoamento superficial e velocidade de fluxo superficial, alcançando a redução na energia de escoamento e sua capacidade de separar partículas do solo e transportá-las para os riachos (Grace e Cliton, 2007; Kastridis, 2020), o que é afetado pela proximidade à rede hidrográfica, ou seja, quanto mais distante da rede de drenagem menor será o fluxo superficial de água, portanto, as áreas da fazenda mais distantes a rede de drenagem foram consideradas áreas em níveis de maior prioridade para estradas florestais.
ITU (4)	De acordo com Waga et al. (2020), ITU é uma boa variável para descrever a qualidade da estrutura rodoviária não pavimentada. O ITU quantifica a tendência da distribuição da água no solo, afetado também pela topografia (Raduła et al., 2018), portanto, é útil para a identificação das áreas hidrologicamente sensíveis. Essas áreas devem receber atenção especial devido a sua propensão em gerar escoamento superficial, mesmo em condições de chuva de baixa intensidade. Elas também são áreas sensíveis aos processos erosivos, pela movimentação da água em superfície, que causam carreamento de partículas de solo, consideradas áreas de baixa prioridade.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 3 apresenta a espacialização dos critérios utilizados para priorização de áreas na alocação de estradas florestais, juntamente com suas equações de pertinência utilizadas na etapa de normalização.

**Figura 3** - Critérios e funções de pertinência dos critérios: (1) declividade, (2) erodibilidade, (3) DRH e (4) ITU, das fazendas de produção florestal (A) e (B), SP, Brasil.



Fonte: Autoria própria.

A relação de importância entre eles e seus respectivos pf são apresentadas na Tabela 2, a qual foi estabelecida a partir de literatura e consulta à especialistas. A declividade foi o critério mais importante (pf 31,20%) para indicar as áreas críticas para alocação de estradas florestais. Por outro lado, o ITU (pf 12,72%) foi considerado o menos importante. A erodibilidade (fator K) ficou em segundo lugar em importância (pf 28,04%), e o DRH (pf 28,04%) ocupou a terceira posição. Para este estudo, foi obtida uma matriz com TC de 0,01; indicando que os valores de comparação entre os critérios são adequados.

**Tabela 2** - Matriz de comparação de pares para as fazendas de produção florestal (A) e (B), SP, Brasil.

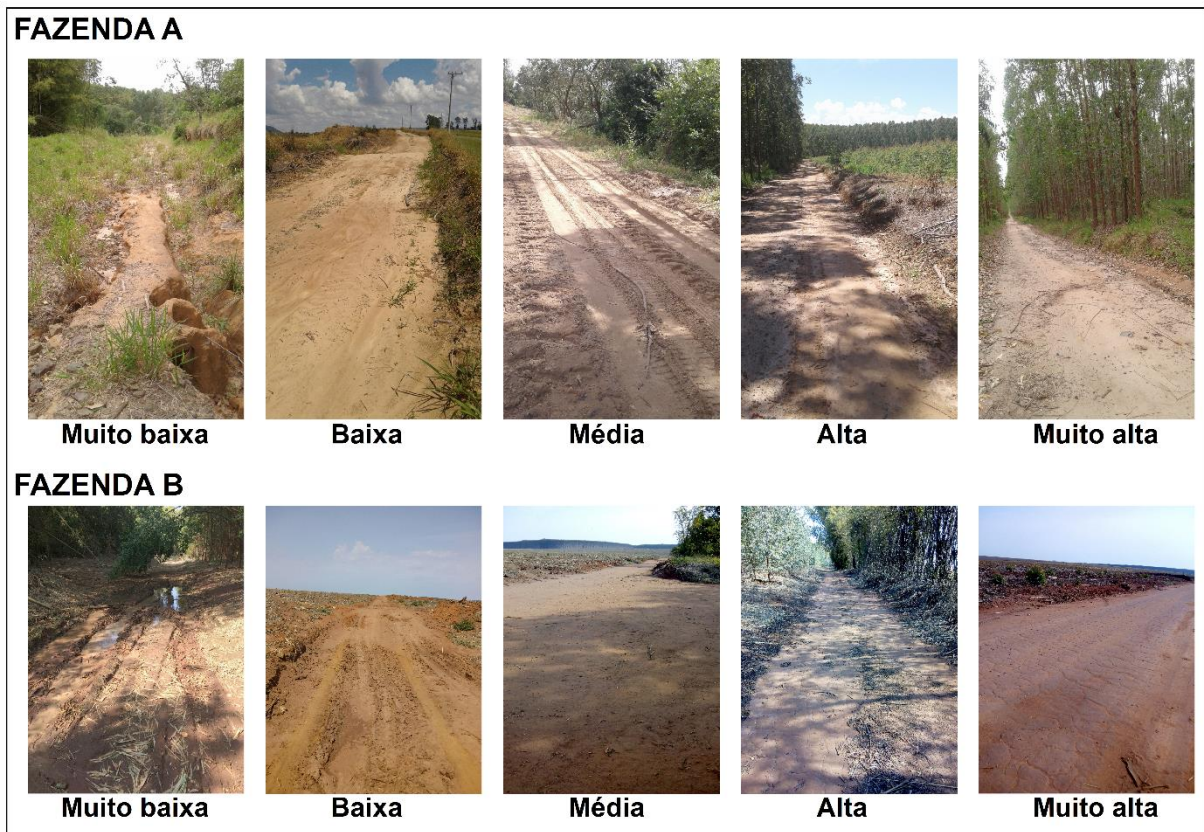
Critérios	Declividade	Erodibilidade	DRH	ITU	Pesos de fator (pf)
Declividade	<b>1</b>				0,3120
Erodibilidade	1	<b>1</b>			0,2804
DRH	1	1	<b>1</b>		0,2804
ITU	1/3	1/2	1/2	<b>1</b>	0,1272
Taxa de consistência ( <i>TC</i> ) = 0,01					1

Fonte: Autoria própria.

A Figura 4 exemplifica as situações em campo das classificações dessas estradas, com diferentes níveis de prioridade.

As estradas com prioridade muito baixa, refletiram defeitos no leito das estradas, principalmente os relacionados a umidade do solo, erodibilidade do solo, declividade e proximidade com a rede hidrográfica. Assim, conforme houve um aumento de prioridade, se obteve cada vez melhores características, ou seja, menores os impactos ambientais negativos nas estradas florestais.

**Figura 4-** Estradas florestais classificadas em níveis de prioridade, para as fazendas de produção florestal (A) e (B), SP, Brasil.



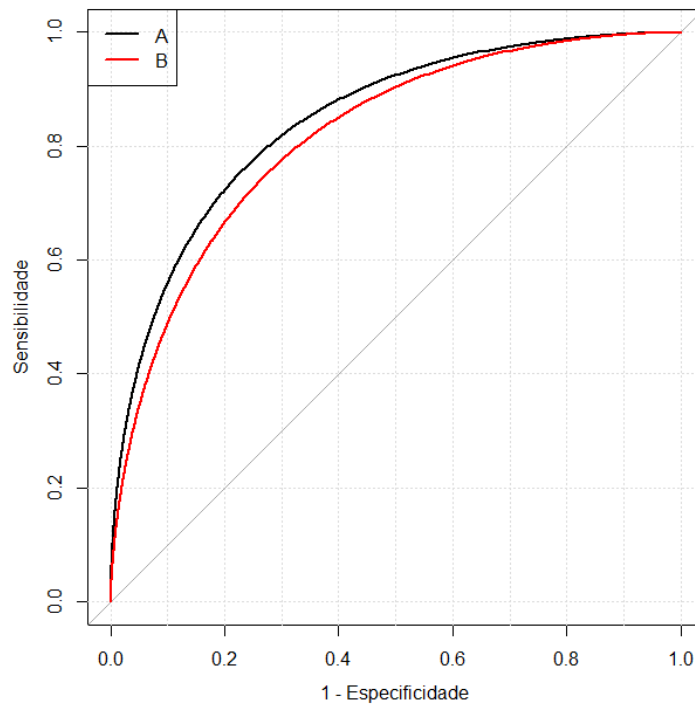
Fonte: Autoria própria.

Quanto à AUC produzida para avaliação do mapeamento, os resultados são apresentados na Figura 5. Para as duas fazendas o método CLP obteve um desempenho muito bom, tendo a fazenda A um valor de AUC igual a 0,8831, com um intervalo de confiança variando entre 0,7759 a 0,9902. Ou seja, apresentou um limiar de 21,43% na previsão da representatividade dos critérios no mapa final, com acurácia de 88,31%.

A fazenda B obteve um valor de AUC igual a 0,8285, com um IC de 0,7005 a 0,9564. Ou seja, apresentou um limiar de 25,59% na previsão da representatividade dos critérios no mapa final, com acurácia de 82,85%. Os dois valores são estatisticamente significativos, pois descartam a hipótese nula que seria uma AUC de 0,50, em que se encontra um modelo aleatório, ou seja, sem informação.

Estes resultados indicam que o método classificou com precisão o nível de prioridade das estradas florestais, levando em consideração os critérios e os pesos a eles atribuídos, bem como refletiram a espacialização real das fazendas.

**Figura 5** - Curva ROC para a aplicação do método CLP, nas fazendas de produção florestal (A) e (B), SP, Brasil.



Fonte: Autoria própria.

#### 4. Discussão

As áreas prioritárias identificadas para alocação de estradas florestais (Figura 2) refletem os critérios estabelecidos neste estudo, bem como sua importância, representada pelos pesos de fator. Dessa forma, as áreas consideradas muito prioritárias correspondem a locais das fazendas com baixa declividade, baixa umidade (ITU), baixa erodibilidade e distantes da rede hidrográfica.

A partir da agregação dos critérios com o método CLP de AMC, foram obtidos os níveis de prioridade para a alocação de estradas, sendo que os níveis médios de prioridade foram os mais frequentes nas áreas das fazendas A (53,43%) e B (57,82%). Além disso, as classes alta, média e baixa abrangeram juntas 99,88% da área de estudo da fazenda A e 99,48% da fazenda B.

A concentração de áreas classificadas nas classes médias e, não predominantemente as extremas (muito baixa e muito alta), é uma característica do método da CLP (Malczewski et al., 2003). Autores como Malczewski et al. (2003), Boroushaki e Malczewski (2008), Valente e Vettorazzi (2008, 2013) indicaram que os mapas desenvolvidos por meio do método da CLP, têm uma tendência para a generalização, com uma alta porcentagem de área classificada como

média prioridade. Por esta razão, os mapas gerados pela CLP apresentam soluções "não arriscadas" para o processo de tomada de decisão.

A respeito dos pesos de fator de cada critério, a Taxa de Consistência (TC) (igual a 0,01; Tabela 2), indica que os pesos foram gerados de forma aleatória, uma vez que o valor foi inferior a 0,10, conforme mencionado por Malczewski e Rinner (2015) como aceitável.

O critério de declividade foi considerado como mais importante, pois geralmente, a declividade é uma variável forte e significativa na explicação da produção de sedimentos, seja sozinha ou em conjunto com outras variáveis (Luce e Black, 1999; Ramos Scharrón, 2010). Seu peso de fator foi igual a 31,20%, de acordo com a Tabela 2. O impacto da declividade na geração de sedimentos em estradas não pavimentadas é amplamente reconhecido e pode apresentar diferentes comportamentos, dependendo das condições da área de estudo e da metodologia aplicada.

Quanto aos critérios erodibilidade e DRH, estes obtiveram os mesmos pesos (Tabela 2; 28,04%), sendo diretamente correlacionados também ao critério declividade. Quando se pensa em estradas florestais, como em sua maioria não são pavimentadas, estas estão expostas ao aumento do escoamento superficial e à ocorrência de erosão do solo (Papierowska et al., 2020), de modo que estes dois critérios contribuíram igualmente para o mapa final. Eles permitiram identificar áreas com menor estabilidade do solo, ou seja, locais com maior erodibilidade do solo, que foram considerados menos prioritários para a alocação de estradas florestais.

Ao realizar o cálculo da distância da rede hidrográfica, considerou-se que as áreas prioritárias para alocar estradas florestais eram aquelas mais distantes das áreas de preservação permanente e reserva legal, que são consideradas áreas mais sensíveis na paisagem. Isso ocorre porque, quanto mais próxima da rede hidrográfica, maior será a velocidade e o volume da água, o que está diretamente relacionado ao processo de erosão e movimentação de sedimentos na paisagem, conforme destacado por Parsakhoo et al. (2016). Portanto, a consideração da distância à rede hidrográfica como critério de prioridade na alocação de estradas florestais pode contribuir para a proteção dos recursos hídricos e da biodiversidade da paisagem.

O critério ITU obteve o menor peso de fator (Tabela 2, 12,78%) em função da influência dos demais critérios. No entanto, mesmo com menor peso de fator, o ITU ainda foi capaz de contribuir para a definição de locais prioritários para a alocação de estradas florestais. Especificamente, em locais onde houve proximidade com a rede hidrográfica, declividade e diferentes valores de erodibilidade. Dessa forma, locais com valores menores de ITU são considerados mais prioritários para a alocação de estradas florestais, em conjunto com os outros critérios mencionados anteriormente.

Assim, a atribuição dos pesos de fator permitiu uma combinação coerente dos critérios, resultando em um mapa de prioridade que reflete as características efetivas das áreas estudadas. Isso pode ser observado, por exemplo, nas estradas já existentes na fazenda florestal, conforme ilustrado na Figura 4, onde é possível perceber que o nível de prioridade está associado diretamente à intensidade da representação dos critérios em determinados locais no campo, na escala de 255 bytes.

Assim, os pontos associados a valores próximos a 255 bytes indicaram regiões no campo que eram altamente prioritárias para a alocação de estradas, o que explica porque as estradas já existentes nesses locais estavam em boas condições (Figura 4). Esses locais possuíam valores baixos de declividade, erodibilidade e ITU (umidade), e estavam mais distantes da rede hidrográfica.

As Figuras 4A e 4B, ilustram uma estrada que foi classificada com prioridade muito baixa e, neste exemplo, há presença de um processo de uma erosão e de acúmulo de água no leito da estrada, respectivamente. Nessa condição, a estrada sofreu influência da alta declividade, da proximidade a rede hidrográfica, ao solo com alta erodibilidade e uma área úmida. E, com isso, comprova-se a relação de correspondência entre o mapa e as estradas existentes na fazenda, que vem suportado pela validação do método com a análise ROC.

Neste contexto, a análise estatística ROC (Figura 5), contribuiu com mais uma avaliação da metodologia aqui empregada, indicando uma acurácia igual a 88,31% para a fazenda A e de 82,85% para a fazenda B. De acordo com os autores Falah et al. (2019); Kanani-Sadat et al. (2019); Chukwuma et al. (2021), a taxa de previsão foi classificada como muito boa, que é o intervalo de valores entre 0,8 a 0,9. Segundo Berrar e Flach (2011), um bom classificador deve ter uma AUC próxima a um (1), o que indica um resultado estatisticamente significativo para a metodologia empregada, no qual os critérios estão sendo representados no mapa final.

Para este estudo, a espacialização de áreas prioritárias (i.e., estradas) corresponde com o que foi definido pelo processo decisório de acordo com o comportamento de cada critério, sendo o método CLP adequado para o objetivo aqui proposto. A vantagem de se obter bons resultados com o método tradicional da AMC, está no fato de ser um método flexível e de fácil implementação. Deste modo, os quatro critérios selecionados para indicar áreas prioritárias à alocação de estradas, representaram as características prioritárias, visando à conservação da água e do solo da paisagem.

Com este modelo decisório é possível identificar melhores locais para se alocar estradas florestais, e detectar as regiões com maiores danos na rede viária, permitindo uma resposta mais

rápida dos gestores florestais, economizando assim reparos caros e em larga escala. Este modelo decisório se torna indispensável para as empresas florestais, visto que a maioria dos custos do manejo florestal estão relacionados à construção e a manutenção de estradas florestais, e que os efeitos ambientais negativos gerados podem se tornar irreversíveis.

## 5. Conclusão

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que o método da combinação linear ponderada da avaliação multicriterial, permite definir áreas prioritárias à alocação de estradas florestais, a partir dos critérios selecionados, os quais são de fácil elaboração e representam as características das estradas florestais.

A análise ROC apresenta resultado estatisticamente significativo para as duas fazendas, validando o processo de tomada de decisão, comprovando que há compatibilidade entre os pesos de fator dos critérios; entre os critérios e correspondência da situação atual da estrada com os níveis de prioridade, demonstrando coerência com a solução apresentada no mapa final, acrescentando assim, robustez ao processo decisório.

Finalmente, pode-se destacar que a priorização de áreas para alocação de estradas florestais, conduz a uma otimização dos recursos e de ações dos gestores florestais. Neste contexto, é possível identificar os melhores locais para se ter as estradas florestais, além de ser possível detectar as regiões com maiores problemas ambientais e que necessitam de manutenções. Sendo assim, o modelo decisório permite a gestão da paisagem, visando a conservação do solo e da água.

## Referências

Aguiar, M. O., Fernandes da Silva, G., Mauri, G. R., Ferreira da Silva, E., Ribeiro de Mendonça, A., Martins Silva, J. P., Silva, R.F., Santos, J. S., Lavagnolo, G.L., Figueiredo, E. O. Metaheuristics applied for storage yards allocation in an Amazonian sustainable forest management area. **Journal of Environmental Management**, v.271, 110926, 2020. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110926.

Ahammad, R., Stacey, N., Sunderland, T. Analysis of forest-related policies for supporting ecosystem services-based forest management in Bangladesh. **Ecosystem Services**, v.48, 101235, 2021. doi:10.1016/j.ecoser.2020.101235

Akay, A. O., Akgul, M., Demir, M. Determination of Temporal Changes on Forest Road Pavement with Terrestrial Laser Scanner. **Fresen. Environ. Bull**, v.27, p.1437-1148, 2018.

Álvarez-Miranda, E., Garcia-Gonzalo, J., Ulloa-Fierro, F., Weintraub, A., Barreiro, S. A multicriteria optimization model for sustainable forest management under climate change uncertainty: an application in Portugal. **Eur J Oper Res**, v.269, n.1, p.79–98, 2018. doi: 10.1016/j.ejor.2017.04.052

Anavberokhai, I. O. Introducing GIS and Multi- Criteria analysis in road path planning process in Nigeria, 36 f., 2008, MsC Thesis, University of Gavle, Department of Technology and Built Environment, Nigeria.

Baskent, E. Z., Keles, S. Spatial forest planning a review. **Ecol Modell**, v.188, n. 2-4, p.145–173, 2005. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.01.059

Berrar, D., Flach, P. Caveats and pitfalls of ROC analysis in clinical microarray research (and how to avoid them). **Briefings in Bioinformatics**, v.13, n.1, p. 83-97, 2011. doi:10.1093/bib/bbr008.

Bertoni, J., Lombardi, N. F. **Conservação do solo**. 3.ed. São Paulo: Ícone, 1990. 355p.

Bjorklund, E. S. Environmental Statement. Wood Supply Europe Report, Stora Enso Forest Product, Sweden. 3, 2005.

Borouhaki, S. Entropy-Based Weights for MultiCriteria Spatial Decision-Making. **Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers**, v. 79, p. 168-187, 2017. doi: 10.1353/pcg.2017.0009.

Borouhaki, S., Malczewski, J. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operator with fuzzy. **Computer and Geosciences**, v.34, n.4, p.399-410, 2008. doi: 10.1016/j.cageo.2007.04.003

Bouyoucos, G. J. The Clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. **Journal of the American Society of Agronomy**, v.27, p. 738-741, 1935. doi: 10.2134/agronj1935.00021962002700090007x

Brasil. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis no 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428,

de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis no 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm). Acesso em: 12 janeiro de 2023.

Çalışkan, E. Planning of environmentally sound forest road route using GIS & S-MCDM. **Šumarski List**, v.141, n.11-12, p.591–591, 2017. doi:10.31298/sl.141.11-12.6

Çalışkan, E., Bediroglu, Ş., 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. doi: 10.15666/aeer/1701\_759779.

Çalışkan, E. Planning of forest road network and analysis in mountainous area. **Life Science Journal.**, v.10, n.2, p. 2456-2465, 2013

Chukwuma, E. C., Okonkwo, C. C., Ojediran, J. O., Anizoba, D. C., Ubah, J. I., Nwachukwu, C. P. A GIS based flood vulnerability modelling of Anambra State using an integrated IVFRN-DEMATEL-ANP model. **Heliyon**, v. 7, n. 9, e08048, 2021. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08048.

Demir, M., Makineci, E., Kartaloglu, M. Temporal Sediment Production of Paved and Unpaved Forest Roads. **Fresen. Environ. Bull**, v.21, n.5, p.1180-1185, 2012.

Eastman, J. R. **IDRISI selva: guide to GIS and image processing**. 2012, 322p.

Egan, A., Jenkins, A., Rowe, J. **Forest Road in West Virginia, USA: Identifying Issues and Challenges**. Morgantown, West Virginia University: 8, 1985.

Enache, A., Ciobanu, V. D., Kühmaier, M., Stampfer, K. An Integrative Decision Support Tool for Assessing Forest Road Options in a Mountainous Region in Romania. **Croat. J. For. Eng.**, v. 34, p. 43–6, 2013.

Erdem, R., Enez, K., Demir, M. Sariyildiz, T. Slope Effect on the Sediment Production of Forest Roads in Kastamonu of Turkey. **Fresen. Environ. Bull.**, v.27, p. 2019-2025, 2018.

Falah, F., Rahmati, O., Rostami, M., Ahmadisharaf, E., Daliakopoulos, I.N., Pourghasemi, H.R. Artificial neural networks for flood susceptibility mapping in data-scarce urban areas.

*In*: Pourghasemi HR, Gokceoglu C, editors. Spatial modeling in GIS and R for Earth and environmental sciences. Amsterdam: **Elsevier**; p. 323–336, 2019.

Furniss, M. J., T. D. Roelofs, C. S. Yee. "Road construction and maintenance." **American Fisheries Society Special Publication**, v. 19, p. 297-323, 1991.

Gardner, R. B. Some environmental and economic effects on alternative forest road designs. **Transitions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.22, p.63-68, 1997.

Grace III, J. M. , Clinton, B. D. Protecting Soil and Water in Forest Road Management. **Transactions of the ASABE**, v.50, n.5, p.1579–1584, 2007. doi:10.13031/2013.23969.

Hayati, E., Majnounian, B., Abdi, E. Qualitative evaluation and optimization of forest road network to minimize total costs and environmental impacts. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v.5, n. 3, p. 121–125, 2012a. doi: 10.3832/ifor0610-009.

Hayati, E., Majnounian, B., Abdi, E., Sessions, J., Makhdoum, M. An expert-based approach to forest road network planning by combining Delphi and spatial multicriteria evaluation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.185, n. 2, p. 1767–1776, 2012b. doi: 10.1007/s10661-012-2666-1.

Hippoliti, G. **Appunti di Meccanizzazione Forestale**, Società Editrice Fiorentina: Firenze, Italy, 1997, 320 p.

Hosseini, S. A., Solaymani, K. Investigation of effective factors for path tracing using GIS in Kheyroud forest (Iran-Mazadaran province). **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v.9, n.11, p. 2055–2061, 2006. doi: 10.3923/pjbs.2006.2055.2061

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2022). Biomes of Brazil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/15842-biomas.html>. Acesso em 27 de janeiro de 2022.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Core writing team, Pachauri RK, Meyer LA, editors. 2014. Climate change 2014: synthesis report, contribution of working groups I, II and III to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genova: IPCC.

Jaafari, A., Najafi, A., Rezaeian, J., Sattarian, A. Modeling erosion and sediment delivery from unpaved roads in the north mountainous forest of Iran, **Int J Geomath**, v.6, n.2, p. 343- 356, 2015. doi:10.1007/s13137-014-0062-4

Jusoff, K. Construction of new forest roads in Malaysia using a GIS-based decision support system. **Computer ve Information Science**, v.1, n.3, p. 48–59, 2008. doi: 10.5539/cis.v1n3p48

Kanani-Sadat, Y., Arabsheibani, R., Karimipour, F., Nasser, M. A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on GIS based hybrid multi criteria decision-making method. **J. Hydrol.**, v.572, p.17–31, 2019. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.034

Kastridis, A. Impact of Forest Roads on Hydrological Processes. **Forests**, v.11, 1201, 2020. doi.org/10.3390/f11111201

Kazama, V. S., Corte, A. P. D., Robert, R. C. G., Sanquetta, C. R., Arce, J. E., Oliveira-Nascimento, K. A., DeArmond, D. Global review on forest road optimization planning: Support for sustainable forest management in Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 492, 119159, 2021. doi:10.1016/j.foreco.2021.119159.

Kesgin, B., Ersoy, E. **Peyzaj Planlamada Coğrafi Bilgi Sistemi Aracı Olarak Konumsal Karar Destekleme Sisteminin Uygulanması** (Application GIS and Spatial Multicriteria decision), IV. Coğrafi Bilgi Sistemleri Gunleri, Fatih Universitesi, İstanbul, 2006.

Krč, J., Beguš, J. Planning forest opening with forest roads. **Croat J For Eng**, v.34, n.2, p. 217-228, 2013.

Laschi, A., Neri, F., Montorselli, N. B., Marchi, E. A methodological approach exploiting modern techniques for forest road network planning. **Croat. J. For. Eng**, v.37, p. 319-331, 2016.

Laschi, A., Foderi, C., Fabiano, F., Neri, F., Cambi, M., Mariotti, B., Marchi, E. Forest road planning, construction and maintenance to improve forest fire fighting: a review. **Croat. J. For. Eng.**, v.40, p. 207–219, 2019.

Leung, F.T.Y., Yan, W.M., Hau, B.C.H., Tham, L.G. Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability. **Catena**, v.125, p. 102–110, 2015. doi: 10.1016/j.catena.2014.10.018

Lotfalian, M., Babadi, TY, Akbari, H. Impactos dos tratamentos de estabilização do solo na redução da perda de solo e do escoamento superficial em taludes de estradas florestais em florestas hircanianas. **Catena**, v.172, p.158-162, 2019. doi: 10.1016 / j.catena.2018.08.023.

Luce, C. H., Black, T. A. Sediment production from forest roads in western region. **Water Resour. Res.** v.35. n.8, p. 2561-2570, 1999. doi: 10.1029/1999WR900135

Maesano, M., Picchio, R., Lo Monaco, A., Neri, F., Lasserre, B., Marchetti, M. Productivity and energy consumption in logging operation in a Cameroonian tropical forest. **Ecol. Eng.**, v.57, p.149-153, 2013. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.013

Makineci, E., Demir, M., Kartaloglu, M. Temporal Changes in Carbon and Nitrogen Levels in Sediment from Paved and Unpaved Forest Roads. **Fresen. Environ. Bull.**, v. 24, n.8, p. 2484-2489, 2015.

Malczewski, J. **GIS and multicriteria decision analysis**. New York: John Wiley and Sons, 1999, 408p.

Malczewski, J., Chapman, T., Flegel, C., Walters, D., Shrubsole, D., Healy, M.A. GIS-multicriteria evaluation with Ordered Weighted Averaging (OWA): developing management strategies for rehabilitation and enhancement projects in the Cedar Creek watershed. **Environment and planning**, v.35, n.10, p.1769-1784, 2003. doi: 10.1068/a35156

Malczewski, J., Rinner, C. **Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science**. London: Springer, 2015. 331p

Megahan, W. F. Effects of forest roads on watershed function in mountainous areas. In: Balasubramiam, **Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks**, Balkema Publishing, p. 335–347, 1987.

Moeinaddini, M., Khorasani, N., Danehkar, A., Darvishsefat, A. A., Zienalyan, M. Siting MSW landfill using weighted linear combination and analytical hierarchy process (AHP)

methodology in GIS environment (case study: Karaj). **Waste Management**, v.30, n. 5, p. 912–920, 2010. doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.015.

Mohammadi Samani, K., Hosseiny, S. A., Lotfalian, M., Najafi, A. Planning road network in mountain forests using GIS ve analytic hierarchical process (AHP). **Caspian Journal of Environmental Sciences**, v.8, n.2, p. 151–162, 2010

Norizah, K., Samani, M. Developing Priorities and Ranking for Suitable Forest Road Allocation using Analytic Hierarchy Process (AHP) in Peninsular Malaysia. **Sains Malaysiana**, v.41, n.10, p. 1177–1185, 2012

Papierowska, E., Szatyłowicz, J., Ruta, M., Łachacz, A., Gnatowski, T., Stańczyk, T. Water repellency of soils on unpaved roads in coniferous forests. **Catena**, v. 195, 104784, 2020. doi:10.1016/j.catena.2020.104784

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, 2016. doi: e059.10.5424/fs/2016252-07815.

Pellegrini, M., Grigolato, S., Cavalli, R. Spatial multicriteria decision process to define maintenance priorities of forest road network: an application in the Italian Alpine region. **Croat J For Eng.**, v.34, n.1, p. 31–42, 2013.

Picchio, R., Pignatti, G., Marchi, E., Latterini, F., Benanchi, M., Foderi, C., Venanzi, R., Verani, S. The Application of Two Approaches Using GIS Technology Implementation in Forest Road Network Planning in an Italian Mountain Setting. **Forests**, v.9, n.5, p. 277, 2018. doi:10.3390/f9050277.

Potocnik, I. The multiple use of forest roads and their classification. In: Food and Agriculture Organization of United Nations. **Proceedings of the seminar on environmentally sound forest roads and wood transport**, Sinaia, 1996.

Raduła, M. W., Szymura, T. H., Szymura, M. Topographic wetness index explains soil moisture better than bioindication with Ellenberg's indicator values. **Ecological Indicators**, v.85, p. 172–179, 2018. doi:10.1016/j.ecolind.2017.10.011

Ramos-Scharrón, C.E., MacDonald, L.H. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St. John, US Virgin Islands. **Earth Surf. Proc. Land.**, v.30, n.10, p.1283-1304, 2005. doi: 10.1002/esp.1201

Saaty, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation.** New York: McGraw, 1980, 281p.

Sadek, S., Berdan, M., Kaysi, I. GIS platform multi- criteria evaluation of route alignments. **Journal of Transportation Engineering**, v.125, n.2, p.144–151, 1999.

Sakai, H. Planning of long-term forest-road networks based on rational logging and transportation systems. **Bull Univ Tokyo For.**, v.76, p.1–85, 1987.

Şener, B. **Landfill Site Selection by Using Geographic Information Systems**, 132 f, 2004. MSc Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Ankara

Seyed Ata Ollah, H., Mohsen, G., Mehrdad, N. Forest road network assessment using lookout points orienting in Hyrcanian forest using GIS – Short Communication. **Journal of Forest Science**, v.64, n. 9, p. 402-408, 2018. doi:10.17221/45/2018-jfs.

Tampekis, S., Sakellariou, S., Samara, F., Sfougaris, A., Jaeger, D., Christopoulou, O. Mapping the optimal forest road network based on the multicriteria evaluation technique: the case study of Mediterranean Island of Thassos in Greece. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.187, n.11, 2015. doi:10.1007/s10661-015-4876-9.

Tavankar, F., Bonyad, A., Marchi, E., Venanzi, R., Picchio, R. Effect of logging wounds on diameter growth of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) trees following selection cutting in Caspian forests of Iran. **New Zeal. J. For. Sci.**, v.45, n.19, 2015.

Tavankar, F., Nkkooy, M., Venanzi, R., Lo Monaco, A., Picchio, R. Study of forest road effect on tree community and stand structure in three Italian and 1 Iranian temperate forests. **Croat. J. For. Eng.**, v. 39, n.1, p. 17-21, 2018.

Turk, Y. Forest road design with cad software: a case study in the Western Black Sea region of Turkey. **Fresenius Environ. Bull.**, v.28, n.3, p.1743-1751, 2019.

Valente, R. A., Vettorazzi, C. A. Avaliação multicriterial na definição de áreas prioritárias à restauração florestal, visando ao manejo sustentável da água. In: Argemiro L. B., Carolina B., Jeferson, F., Selbach, O. H.. (Org.). Sustentabilidade do uso da água nos trópicos e subtropicais: estudos de caso. Ijuí: Unijui, v. 1, p. 285-318, 2013.

Valente, R. A., Vettorazzi, C. A. Definition of priority areas for forest conservation through the Ordered Weighted Averaging method. **Forest Ecology and Management**, v.256, p.1408 – 1417, 2008. doi: 10.1016/j.foreco.2008.07.006

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. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.05.069

Voogd, H. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. London: **Pion**, 1983. p.125.

Waga, K., Malinen, J., Tokola, T. A Topographic Wetness Index for Forest Road Quality Assessment: An Application in the Lakeland Region of Finland. **Forests**, v.11, n.11, 1165, 2020. doi:10.3390/f11111165

Wang, Y., Hong, H., Chen, W., Li, S., Pamucar, D., Gigovic, L., Drobnjak, S., Bui, D. T., Duan, H. A hybrid GIS multicriteria decision-making method for flood susceptibility mapping at shangyou, China. **Rem. Sens**, v.11, n.1, 62, 2019. doi: 10.3390/rs11010062

Yoshida, M., Sakurai, R., Sakai, H. Forest road planning using precision geographic data under climate change. **International Journal of Forest Engineering**, p. 1–9., 2018. doi: 10.1080/14942119.2018.1498687.

Ziegler, A. D., Sutherland, R. A., Giambelluca, T. W. Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. **Water Resources Research**, v.36, n.9, 2787-2791, 2000. doi:10.1029/2000wr900137

## **CAPÍTULO 5: Comparação entre métodos de avaliação multicritério para priorização de áreas à alocação de estradas florestais.**

### **Resumo**

A alocação de estradas florestais em uma paisagem é um problema de gestão, pois envolvem condições diversas do ambiente e diferentes atividades florestais, tais como colheita, transporte florestal e atividades de manejo, e pode ser resolvido a partir da avaliação multicritério (AMC). Visando à conservação dos recursos hídricos e da proteção do solo, o objetivo deste estudo comparar dois métodos de AMC na priorização de áreas para alocação de estradas florestais. Métodos que são tradicionalmente empregados e nomeados de combinação linear ponderada (CLP) e de média ponderada ordenada (MPO). Os critérios, base do processo decisório, foram previamente avaliados em capítulos anteriores, sendo eles: a declividade, a erodibilidade do solo (fator K), a distância à rede hidrográfica e o índice topográfico de umidade. Considerou, ainda resultados de sua agregação por CLP dos capítulos anteriores dessa tese. No entanto, a aplicação de MPO, requer um segundo grupo de pesos para esses critérios, os de ordenação. Para esse estudo, gerou-se oito conjuntos de peso de ordenação (po), baseado no espaço decisório, por meio de distribuições truncadas, assumindo quatro classes de risco com diferentes níveis de compensação. O MPO com melhor desempenho para a fazenda A e B, obtiveram valores de Área sob a Curva (AUC) iguais a 77,79% e 74,86%, respectivamente. As demais alternativas de MPO não promoveram a definição de áreas prioritárias conforme o objetivo deste estudo, tendo mostrado influência excessiva de alguns critérios no mapa final, como consequência não se obteve uma associação entre o mapa final, com os critérios e a realidade observada em campo. O método MPO se mostra como um método adequado para controlar a influência dos critérios na solução final, porém, para este estudo o método CLP se mostrou com melhor desempenho para as fazendas A e B, com AUC iguais a 88,31% e 82,85%, respectivamente. Devido ao detalhamento do banco de dados (resolução espacial), e a coerência dos pesos de fator, o método CLP apoiou a priorização de áreas para ambas as fazendas, contribuindo para a espacialização da realidade in loco. A partir deste estudo, é possível identificar as áreas mais adequadas para alocação de estradas florestais, considerando aspectos da paisagem, de modo a garantir não só a acessibilidade às áreas das fazendas, mas também a conservação do solo e da água.

Palavras-chave: avaliação multicritério; método de tomada de decisão; espaço de estratégia de decisão; gestão florestal; análise de sensibilidade.

## Abstract

The allocation of forest roads in a landscape is a management problem involving environmental conditions and different forest activities, such as harvesting, forest transportation, and management activities. This way, multicriteria evaluation (MCE) can support a solution since it can aggregate criteria representing different characteristics. This study aims to compare two MCE methods, traditionally employed and named weighted linear combination (WLC) and ordered weighted averaging (OWA), for prioritizing areas for forest road allocation, aiming at the conservation of water resources and soil protection. The criteria, which are the basis of the decision-making process, were previously evaluated in earlier chapters: slope, soil erodibility (K factor), distance to the hydrographic network, and topographic wetness index. The aggregation results of these criteria by WLC in previous chapters of this thesis were also considered. However, the application of OWA requires a second set of weights for these criteria, the ordering weights. This study generated eight sets of ordering weights ( $\rho$ ) based on the decision space through truncated distributions, assuming four risk classes with different compensation levels. The best-performing OWA for farms A and B obtained Area Under the Curve (AUC) values of 77.79% and 74.86%, respectively. The other OWA alternatives did not promote the definition of priority areas according to the objective of this study, as they showed the excessive influence of some criteria in the final map, which resulted in no association between the final map, criteria, and observed reality in the field. The OWA method proved suitable for controlling the influence of criteria on the final solution. However, for this study, the WLC method performed better for farms A and B, with AUC values of 88.31% and 82.85%, respectively. Due to the detailed database (spatial resolution) and coherence of the factor weights, the WLC method supported the prioritization of areas for both farms, contributing to the spatialization of the in situ reality. From this study, it is possible to identify the most suitable areas for forest road allocation, considering landscape aspects, in order to ensure not only accessibility to farm areas but also soil and water conservation.

**Keywords:** multicriteria evaluation; decision-making method; decision strategy space; forest management; sensitivity analysis.

## 1. Introdução

As estradas florestais são estruturas essenciais que são planejadas, projetadas, e construídas para manter os produtos florestais fluindo na região de rede econômica (de Carmo et al., 2013; Rönnqvist et al., 2015; Stefanovi'c et al., 2016; Akay et al., 2020; Gomes et al., 2021). A rede viária tem várias aplicações, mas seu principal objetivo é garantir o acesso aos talhões durante todo o ano, assegurando a expansão da extração em áreas inacessíveis (Najafi e Richards, 2013; Akay et al., 2020), portanto, deve ser devidamente planejada (Hayati et al., 2013; Keramati et al., 2020).

Há um consenso de que um sistema florestal precisa de um projeto ideal de sua rede rodoviária (Gumus et al., 2008; Bont et al., 2018; Gomes et al., 2021). Entretanto, o sistema de extração de madeira e implementação da rede rodoviária deve ter um equilíbrio econômico-ambiental (Jaafari et al., 2015).

Uma rede de estradas florestais adequadamente projetada e construída, é necessária para o manejo ideal das florestas (Ferenčík et al., 2019). A manutenção eficiente das estradas é, portanto, uma parte vital da silvicultura, e como tal, requer um sistema eficiente de detecção de danos que permita uma resposta, economizando assim reparos caros e em larga escala (Ferenčík et al., 2019).

Apesar da necessidade de se ter uma rede viária planejada, ainda há lacunas no uso de modelos matemáticos e técnicas computacionais para a solução deste problema (Alonso-Ayuso et al., 2018; Gomes et al., 2021). Alguns problemas de planejamento florestal espacial, estão em aberto e ainda teóricos, especialmente aqueles que visam alcançar florestas esteticamente agradáveis e economicamente viáveis (França et al., 2022). Porém, os estudos sobre planejamento de estradas florestais demonstram avanços no uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e os vários métodos de tomada de decisão, tal como a avaliação multicriterial (AMC), análise e otimização, que destaca a importância da pesquisa em estradas florestais com diferentes variáveis e metodologias aplicadas em diferentes florestas e níveis de planejamento (Kazama et al., 2021).

Até agora, modelos determinísticos têm sido amplamente aplicados para resolver diversos problemas de planejamento florestal (Roise et al., 2016; dos Santos et al., 2019; Simonenkova et al., 2020, Gomes, et al., 2021). Entretanto, há um debate contínuo sobre o efeito de mudanças aleatórias nas soluções. Infelizmente, o processo pode ser mais sensível do que se pensava inicialmente. A incerteza, por exemplo, faz parte dos ambientes estocásticos, como o preço do mercado da madeira, os estoques de produção, as condições climáticas, os

distúrbios naturais ou desastres ambientais e o mau funcionamento de máquinas (Veliz et al., 2015; Robinson et al., 2016; Álvarez-Miranda et al., 2019; Verderame et al., 2010).

Na ciência das estradas florestais, muitos componentes seguem uma probabilidade de distribuição, porque eles podem ser influenciados por fatores que não são completamente conhecidos, tais como condições climáticas, carga do tráfego e taxa de utilização de máquinas (Costello et al., 2005; Ng et al., 2011; Akay et al., 2018). A incerteza no processo é frequentemente abordada pela distribuição de probabilidade, que reduzem o efeito da variável aleatória (Rönnqvist et al., 2015). Portanto, uma compreensão abrangente do processo da incerteza, é desejável para a tomada de decisões florestais, considerando cadeia de fornecimento da madeira (Gomes et al., 2021).

A análise de sensibilidade é um método alternativo para incorporar as incertezas na AMC. Ela se preocupa em como as incertezas em um conjunto de dados de entrada afetam a saída do modelo de decisão multicritério (Malczewski, 2018). A análise de sensibilidade e incerteza, são consideradas como parte integrante do modelo de decisão, como partes de análises de sensibilidade amplamente definidas (Saltelli, 2000; Crosetto e Tarantola, 2001).

Especificamente, a análise de sensibilidade na AMC é um conjunto de métodos para avaliar a incerteza na saída do modelo multicritério e a importância dos fatores de entrada do modelo, tais como os valores e pesos dos critérios. O objetivo é dividir a incerteza na produção para diferentes fontes de incerteza associadas aos fatores de entrada (Saltelli, 2000; Crosetto e Tarantola, 2001).

De fato, existem várias fontes de incerteza em relação aos modelos SIG-AMC, entradas e parâmetros que podem afetar a adequação final do mapa em que se baseará a decisão (Billaud et al., 2020). Se considerarmos o SIG-AMC utilizando o operador da média ponderada ordenada (MPO), quatro fontes principais de incerteza podem ser identificadas no processo de agregação: os dados utilizados para construir os critérios, os métodos utilizados para gerar as camadas geográficas (escala, padronização, etc), os métodos utilizados para determinar os pesos dos critérios e os pesos de ordenação.

A seleção rigorosa do peso de ordenação no SIG-AMC é de grande importância para discutir os resultados com os formuladores de políticas (Comber et al., 2010). Entretanto, a maioria dos estudos se concentram em alguns conjuntos típicos de pesos de ordem sem desenvolver um método claro para explorar eficientemente o espaço bidimensional de estratégia de decisão (Billaud et al., 2020).

Neste contexto, o principal objetivo deste estudo foi identificar áreas prioritárias para alocação de estradas florestais, utilizando a agregação de atributos ambientais por meio do

método MPO, em comparação ao método CLP da avaliação multicriterial. O objetivo específico foi avaliar a importância, e influência dos critérios selecionados no apoio às decisões, com diferentes valores de risco e compensação, por meio de uma análise de sensibilidade.

## 2. Material e métodos

### 2.1. Modelo conceitual de apoio à tomada de decisão

Para elaborar o modelo de apoio à tomada de decisão para priorização de áreas para alocação de estradas florestais, utilizou-se as mesmas fazendas de produção florestal dos capítulos 3 e 4, localizadas em Mogi-Guaçu (fazenda A) e em Bofete (fazenda B). Para elaborar o modelo foi necessário definir critérios, identificar sua importância, normalizá-los e agregá-los.

Os critérios utilizados foram declividade, erodibilidade do solo (fator K), distância à rede hidrográfica (DRH) e índice topográfico de umidade (ITU). A definição dos critérios, sua normalização e identificação da importância foram discutidos no capítulo 4. Os pesos de fator atribuídos aos critérios foram de 31,20% para declividade, 28,04% para fator K e DRH, respectivamente, e 12,72% para ITU.

Foram obtidos dois modelos diferentes para a priorização de áreas, sendo o primeiro elaborado utilizando o método da Combinação Linear Ponderada (CLP), que foi o mesmo elaborado no capítulo anterior. O segundo modelo foi elaborado utilizando o método da Média Ponderada Ordenada (MPO).

A principal diferença entre esses modelos foi a forma de agregação dos critérios. No primeiro modelo, foram utilizados apenas pesos de fator, já no segundo modelo, com o método da MPO, foram mantidos os pesos de fator e acrescidos pesos de ordenação para cada critério.

### 2.2. Método da Média Ponderada Ordenada - MPO

O método da Média Ponderada Ordenada (MPO), é considerado uma generalização e extensão do método da CLP (Jiang e Eastman 2000) (Equação 1). É um conjunto de procedimentos de combinação multicritério desenvolvida por Yager (1988) e estendida para aplicações em SIG por Eastman (1997).

$$MPO_i = \sum_{j=1}^n (V_j Z_{ij}) \quad (1)$$

Sendo:  $Z_{i1} \geq Z_{i2} \geq \dots \geq Z_{in}$  a ordem de ranqueamento dos fatores (para diferentes grupos de pesos);  $v$ : pesos de ordenação

De acordo Jiang e Eastman (2000), o método MPO têm dois parâmetros associados ao CLP, que são o risco de tomada de decisão (R) e a compensação entre critérios (C) e, ao ter R médio para o processo decisório e C total entre critérios, se tem equivalência à aplicação do método CLP.

Conforme Jiang e Eastman (2000), o método MPO é caracterizado pelos parâmetros ANDness (Equação 2) e ORness (Equação 3) (risco assumido) e compensação (trade-off) (Equação 4), que devem ser calculados para cada conjunto de pesos de ordenação.

$$ANDness = \frac{1}{n-1} \sum [(n-i)W_i] \quad (2)$$

$$ORness = 1 - ANDness \quad (3)$$

$$Compensação = 1 - \sqrt{\frac{\sum (\frac{W_i - 1}{n})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Sendo:  $n$  é o número total de fatores;  $i$  é a ordem dos fatores; e  $W$  é o peso do fator de ordem  $i$ .

Com diferentes conjuntos de pesos de ordenação, pode-se gerar uma ampla gama de operadores MPO, incluindo os procedimentos de combinação de mapas baseados em SIG mais frequentemente utilizados, tais como o mapa de combinação linear ponderada (CLP) e operações de sobreposição booleana, tais como a intersecção (AND) e união (OR) (Yager, 1988; Malczewski et al., 2003).

Os operadores AND e OR representam o extremo caso de MPO, e correspondem aos operadores MIN e MAX, respectivamente. Atribuição de pesos de ordem igual resulta na obtenção do CLP convencional, que se situa no ponto médio do contínuo que vai do MIN ao MAX dos operadores (Malczewski, 2006).

O método MPO pode oferecer uma grande variedade de soluções possíveis para o problema de alocação de estradas florestais. Neste estudo, gerou-se 50 pontos aleatórios automaticamente dentro do *software* R-Core Team, por meio de distribuições truncadas, considerando um certo nível de risco e *trade-off*, baseado no estudo de Lenormand (2018). Muitos dos pontos, por estarem na mesma classe de risco, obtiveram resultados semelhantes,

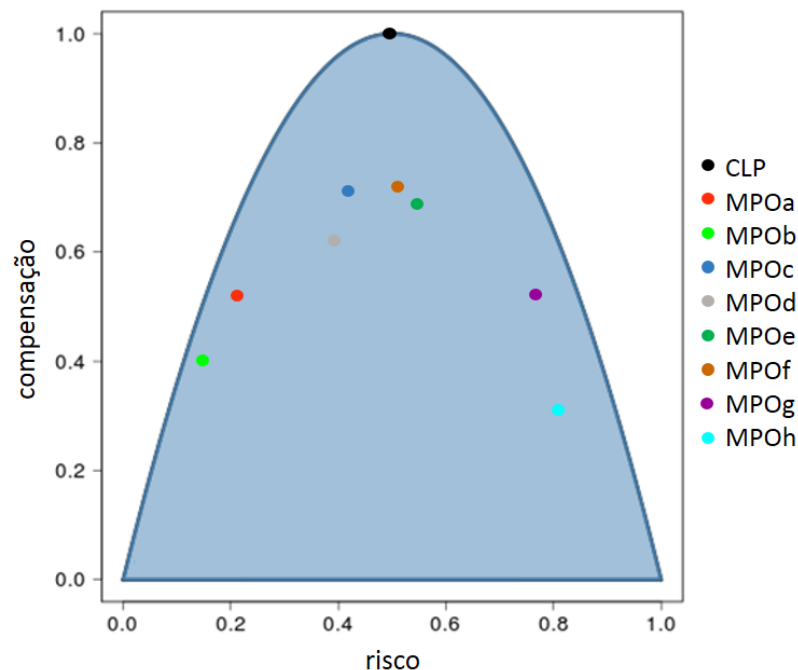
portanto foram reduzidos para oito conjuntos de pesos de ordenação, considerando a variação do risco em quatro classes (0-0,25; 0,25-0,5; 0,5-0,75 e 0,75-1).

A Figura 1 apresenta os oitos conjuntos utilizados para este estudo, sendo:

- (a) baixo nível de risco e compensação média;
- (b) baixo nível de risco e compensação baixa;
- (c) médio nível de risco e compensação alta;
- (d) médio nível de risco e compensação média;
- (e/f) médio nível de risco e compensação alta;
- (g) alto nível de risco e compensação média e
- (h) alto nível de risco e compensação baixa.

Os pesos de ordenação seguiram a ordem de importância apresentado pelo método CLP, sendo do maior (W1) para o menor (W4), declividade, erodibilidade, DRH e TWI.

**Figura 1-** Espaço de decisão com relação da compensação e risco dos critérios para os métodos CLP e MPO.



Fonte: Autoria própria

Os mapas MPO também foram reclassificados em cinco classes como no método CLP, de acordo com a homogeneidade de frequência e distribuição de pixels de cada classe, de acordo com a quebra natural.

### 2.3. Influência dos critérios

Com o objetivo de avaliar individualmente os parâmetros físicos da paisagem relacionados ao relevo, solo e água, e para melhor compreender os critérios utilizados, foram realizadas análises para identificar a influência intrínseca de cada um deles, seguindo a proposta de Valente e Vettorazzi (2008).

Foi adotada a mesma metodologia do capítulo 2 para realizar esse procedimento nos modelos finais obtidos pelo método CLP e MPO, no qual é definida a influência de cada critério, atribuindo-se sucessivamente um peso máximo ( $p_0 = 1$ ) a cada um deles. Ou seja, a posição um foi atribuída ao critério de maior importância, e as demais posições (dois a quatro) receberam o valor zero. O mapa gerado com maior semelhança com um dos critérios indicou aquele de menor influência. Posteriormente, o peso máximo foi associado às demais posições, sendo que a posição quatro (4) indicou o critério com maior influência.

### 2.4. Comparação dos modelos decisórios

Para a comparação dos modelos decisórios, foram definidos 73 pontos de amostragem (N) para cada fazenda florestal (Equação 5). A amostragem se deu de forma aleatória estratificada, definida por uma amostragem casual simples, como proposto por Eastman (2001).

$$N = \frac{Z^2 \cdot p \cdot q}{e^2} \quad (5)$$

Sendo: N= número de amostras; z= valor padrão para um nível de confiança específico (1.96); p= porcentagem de precisão esperada (0.95); q=100 - p; e= erro admissível (0.05).

Dentro do ambiente SIG, para gerar os pontos aleatórios, foi considerado o tamanho linear das estradas, para se ter uma distância média entre os pontos dentro de cada fazenda. O valor de prioridade foi registrado nos mapas de critérios e no mapa final de áreas prioritárias (isto é, produzido pelos métodos CLP e MPO). O nível de coincidência entre estes grupos de pontos foi avaliado (ou seja, o representante, do mapa e do campo), atribuindo-se o valor um (1) quando houve coincidência entre os níveis de prioridade e zero (0) para a condição oposta, estes valores subsidiaram a análise estatística ROC (Característica de Operação do Receptor, do inglês *Receiver Operating Characteristic*).

Vários métodos estatísticos têm sido empregados ao longo dos anos para a validação e comparação de desempenho de mapas dentro do ambiente SIG. Dentre esses métodos

estatísticos, a Área Sob a Curva (AUC, do inglês *Area Under Curve*), da Característica do Operador do Receptor (AUC-ROC), é amplamente utilizada para a validação da precisão de modelos. Assim, este estudo empregou o método AUC-ROC para validar o modelo decisório e examinar a precisão dos mapas com método MPO em comparação ao mapa resultado do método CLP.

A AUC é um índice sintético calculado para curvas ROC, que determina a probabilidade de um evento classificado como positivo pelo teste, ser realmente positivo considerando todos os valores possíveis do teste (Wang et al., 2019). A relação quantitativo-qualitativa que existe entre a AUC e a taxa de previsão é dada da seguinte forma: insatisfatório (0,5–0,6), satisfatório (0,6–0,7), bom (0,7–0,8), muito bom (0,8–0,9) e excelente (0,9 –1) (Falah et al., 2019; Kanani-Sadat et al., 2019; Chukwuma et al., 2021).

### 3. Resultados

A relação de importância entre os critérios considerados essenciais para definir áreas prioritárias para alocação de estradas florestais e seus respectivos pesos fatoriais (pf), foram os mesmo obtidos no capítulo 4. A declividade foi o critério mais importante (pf 31,20%), por outro lado, ITU (pf 12,72%) foi considerado o menos importante. A erodibilidade (fator K) ficou em segundo lugar em importância, e a DRH ocupou a terceira posição, ambos com mesmo peso de fator (pf 28.04%).

Os pesos de ordenação, risco e compensação para o problema de decisão das fazendas florestais A e B (CLP; MPOa, b, c, d, e, f, g e h) são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** - Pesos de ordenação, risco e compensação para diferentes aplicações do método MPO.

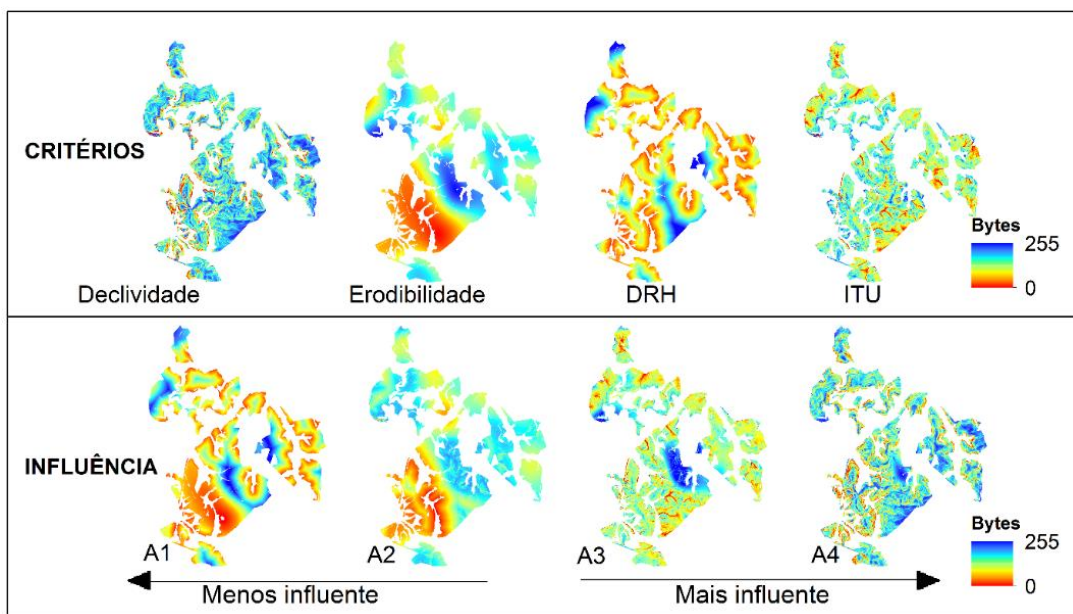
Pesos ordenação	CLP	MPO							
		a	b	c	d	e	f	g	h
Declividade (W1)	-	0,043	0,023	0,123	0,161	0,141	0,134	0,453	0,753
Erodibilidade (W2)	-	0,071	0,096	0,366	0,311	0,422	0,376	0,457	0,057
DRH (W3)	-	0,354	0,2	0,134	0,042	0,354	0,366	0,055	0,105
ITU (W4)	-	0,532	0,681	0,376	0,486	0,083	0,123	0,036	0,086
Risco	0,5	0,208	0,154	0,412	0,383	0,54	0,507	0,775	0,825
Compensação	1	0,531	0,407	0,72	0,617	0,673	0,72	0,527	0,328

Fonte: Autoria própria

A solução de risco médio para tomada de decisão ( $R = 0,50$ ) e compensação total entre os critérios (1) é a descrição do método CLP com pesos de ordem iguais. Nessa condição, não há troca de critérios e, assim, a solução reflete a influência (descrita no item “Pesos de fator”, Tabela 2 do capítulo 4) e a importância atribuída a eles (representada por pesos de ordenação).

Nas Figuras 2 e 3, são apresentadas a ordem de influência dos critérios no processo decisório.

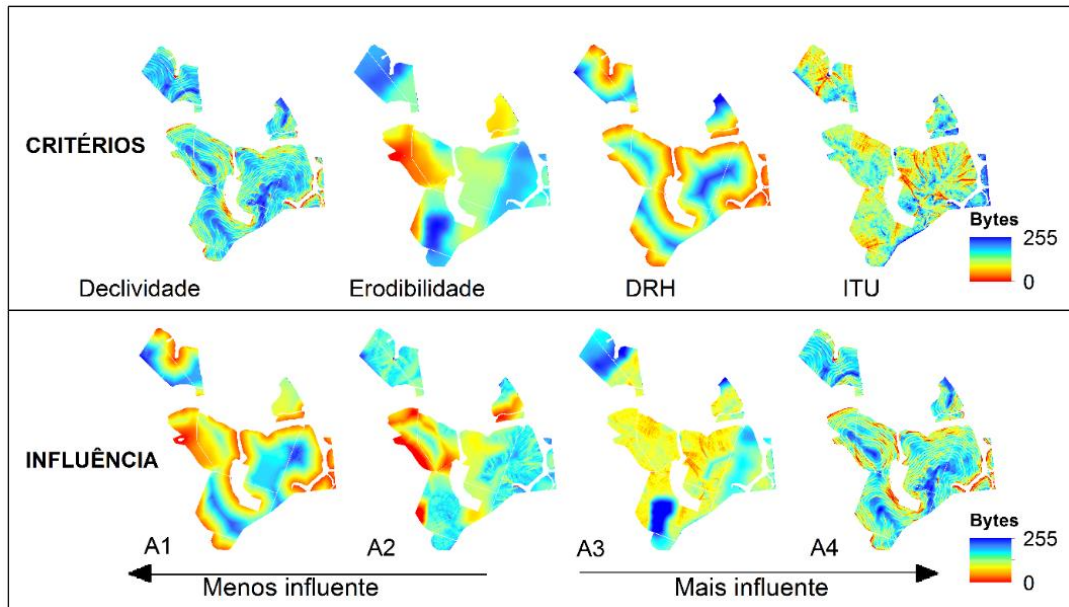
**Figura 2-** Ordem de influência dos critérios no processo decisório para a fazenda de produção florestal A.



Fonte: Autoria própria

Tanto para a fazenda A (Figura 2) quanto para a fazenda B (Figura 3), quando se observa a semelhança dos mapas gerados (segunda linha) com os critérios de entrada (primeira linha), a ordem do menos para o mais influente foi, DRH, erodibilidade, ITU e declividade.

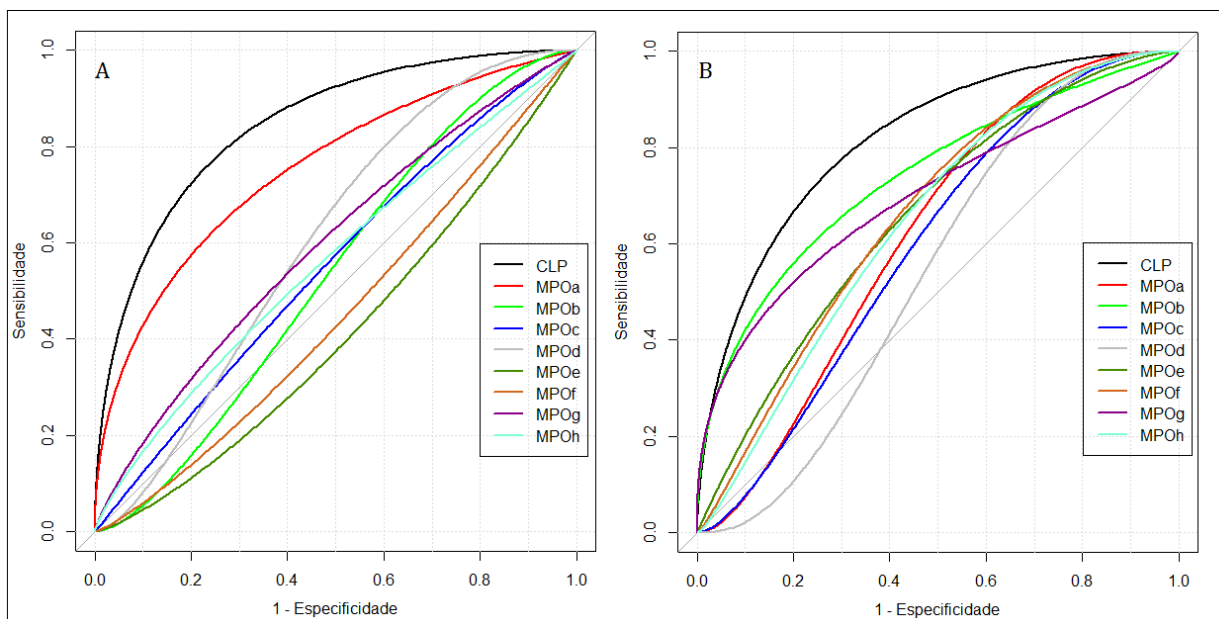
**Figura 3-** Ordem de influência dos critérios no processo decisório para a fazenda de produção florestal B



Fonte: Autoria própria

Quanto à AUC produzida para avaliação do mapeamento, os resultados são apresentados na Figura 4. Para as duas fazendas o método CLP obteve um maior desempenho, tendo a fazenda A um valor de AUC igual a 0,8831; com um intervalo de confiança (IC) variando entre 0,7759 a 0,9902. Ou seja, apresentou um limiar de 21,43% na previsão da representatividade dos critérios no mapa final, com acurácia de 88,31%.

**Figura 4 -** Curva ROC dos métodos CLP e MPO em fazendas de produção florestal, SP, Brasil.



Fonte: Autoria própria

A fazenda B obteve um valor de AUC igual a 0,8285; com um intervalo de confiança de 0,7005 a 0,9564. Ou seja, apresentou um limiar de 25,59% na previsão da representatividade dos critérios no mapa final, com acurácia de 82,85%. Os dois valores são estatisticamente significativos, pois descartam a hipótese nula que seria uma AUC de 0,50; em que se encontra um modelo aleatório, ou seja, sem informação.

Os valores de AUC e intervalo de confiança (IC) para os mapas produzidos pelo método MPO em comparação ao método CLP estão apresentados na Tabela 2 para ambas as fazendas.

Considerando somente as curvas geradas pelo método MPO, na fazenda A, o modelo MPOa obteve o melhor desempenho, com uma AUC igual a 77,79%, já para a fazenda B o melhor resultado foi para o modelo MPOb com 74,86%. Os piores desempenhos foram para o modelo E (44,89%) e D (56,34%), respectivamente para as fazendas A e B.

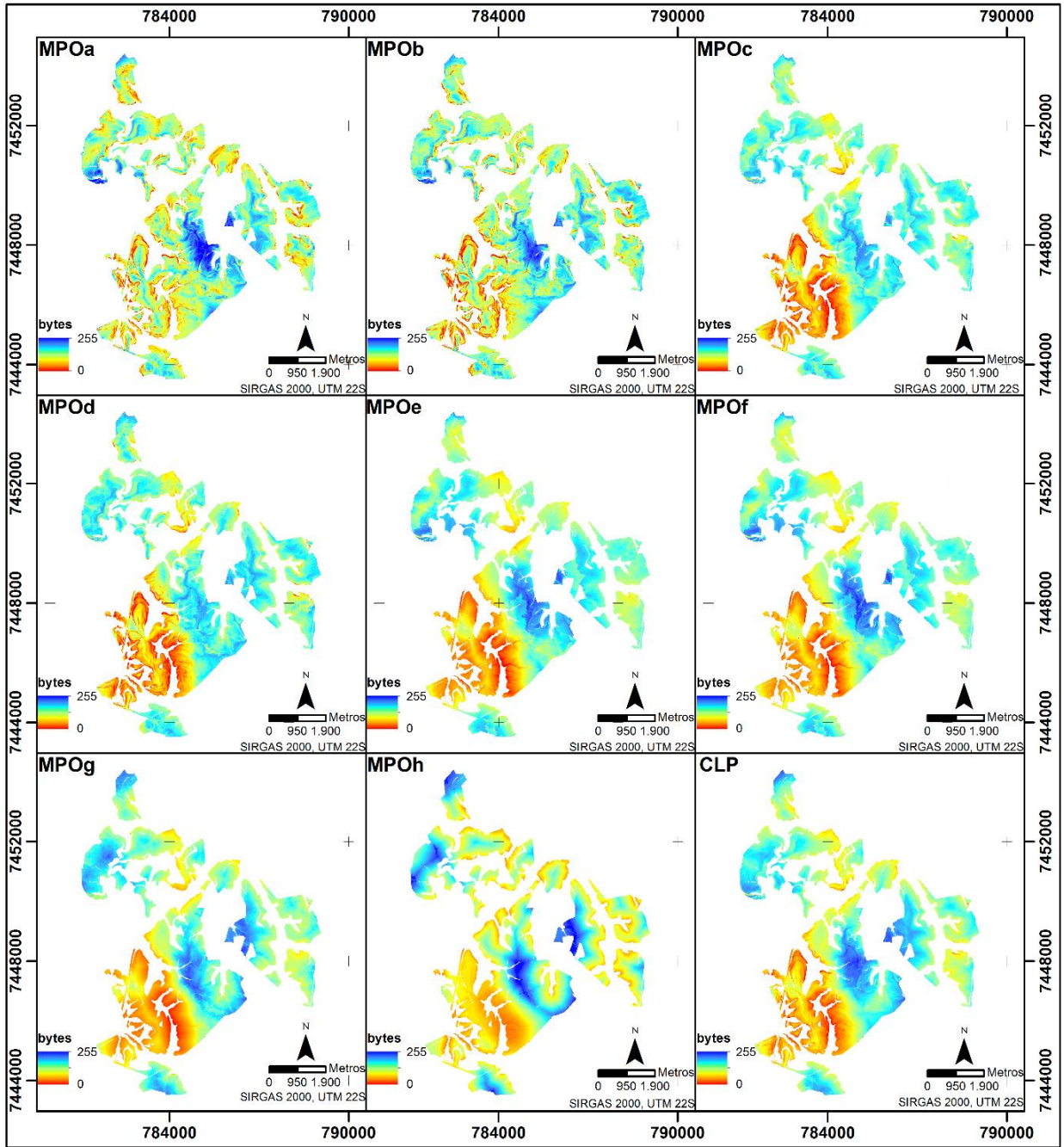
**Tabela 2** - AUC e Intervalo de confiança (IC) para os métodos CLP e MPO, em fazendas de produção florestal, SP, Brasil.

Fazenda	CLP	MPO								
		a	b	c	d	e	f	g	h	
A	AUC	0,8831	0,7779	0,5429	0,5467	0,6201	0,4489	0,4796	0,5973	0,57
	IC	0,7759- 0,9902	0,6407- 0,915	0,3715- 0,7144	0,3997- 0,6937	0,4798- 0,7603	0,309- 0,5888	0,3366- 0,6226	0,4652- 0,7294	0,4324- 0,7075
B	AUC	0,8285	0,6101	0,7486	0,6235	0,5634	0,6592	0,6654	0,7084	0,6529
	IC	0,7005- 0,9564	0,4708- 0,7494	0,4571- 1	0,4886- 0,7585	0,4249- 0,7019	0,5321- 0,7862	0,5397- 0,791	0,5266- 0,8903	0,5265- 0,7794

Fonte: Autoria própria

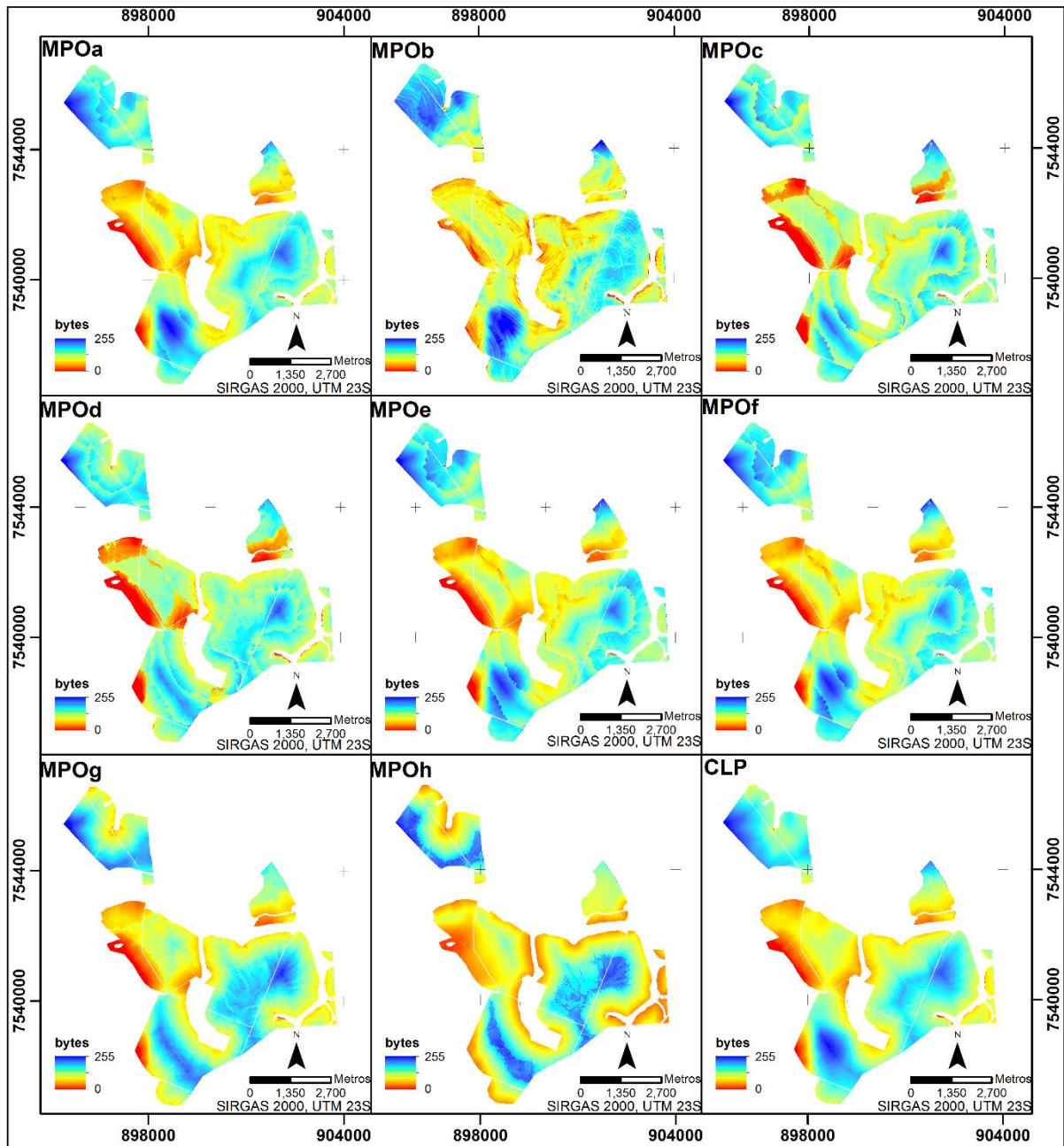
As Figuras 5 e 6 ilustram os mapas gerados pelos métodos CLP e MPO, para as duas fazendas (A e B).

**Figura 5** - Áreas prioritárias para alocação de estradas florestais, a partir dos métodos MPO e CLP, na fazenda de produção florestal B, SP, Brasil.



Fonte: Autoria própria

**Figura 6** - Áreas prioritárias para alocação de estradas florestais, a partir dos métodos MPO e CLP, na fazenda de produção florestal B, SP, Brasil.



Fonte: Autoria própria

A Tabela 3 apresenta as áreas em níveis de prioridade (1-muito baixa, 2- baixa, 3- média, 4- alta, 5-muito alta) para alocação de estradas florestais, classificadas em classes de tamanhos iguais. O modelo CLP para a fazenda A resultou em 53,43% de sua área classificada em média prioridade, 31,85% alta; 14,60% baixa; 0,07% muito baixa e 0,06% muito alta.

Considerando o MPO com melhor desempenho da AUC (77,79%) como sendo o mapa MPOa, que obteve risco baixo (0,208; Tabela 1) e compensação média (0,531; Tabela 1),

resultou em 67,19% da área da fazenda classificada em alta prioridade; 27,32% média; 4,57% muito alta; 0,9% baixa; e 0,02% muito baixa prioridade.

**Tabela 3** - Áreas prioritárias em porcentagem, a partir dos métodos MPO e CLP nas fazendas de produção florestal A e B, SP, Brasil.

<b>Fazenda A</b>		<b>Áreas em porcentagem (%)</b>							
<b>Classes</b>	<b>MPO</b>								<b>CLP</b>
	a	b	c	d	e	f	g	h	
muito baixa (1)	0,02	0,04	0,33	0,43	0,11	0,04	12,47	28,83	0,07
baixa (2)	0,90	1,99	12,23	11,27	17,49	13,99	30,70	51,99	14,60
média (3)	27,32	20,33	22,96	28,99	39,55	42,49	48,99	18,16	53,43
alta (4)	67,19	70,67	62,66	59,00	41,56	41,90	7,85	1,02	31,85
muito alta (5)	4,57	6,97	1,82	0,31	1,30	1,58	0,002	0,0003	0,06
<b>Fazenda B</b>		<b>Áreas em porcentagem (%)</b>							
<b>Classes</b>	<b>MPO</b>								<b>CLP</b>
	a	b	c	d	e	f	g	h	
muito baixa (1)	0,23	0,02	0,05	0,04	1,69	1,43	2,30	11,59	0,40
baixa (2)	15,43	0,08	6,68	4,81	22,46	24,89	27,63	38,93	18,48
média (3)	65,32	8,79	52,61	31,97	63,32	60,85	50,14	29,45	57,82
alta (4)	18,98	84,06	40,56	62,95	12,53	12,82	19,77	17,07	23,19
muito alta (5)	0,03	7,05	0,09	0,23	0,01	0,01	0,16	2,95	0,12

Fonte: Autoria própria

O método CLP para a fazenda B, resultou em 57,82% sua área classificada em média prioridade; 23,19% alta; 18,48% baixa; 0,40% baixa e 0,12% muito alta. Assim como a fazenda A, a fazenda B obteve maior parte da área classificada em média e alta prioridade (81%), o que corresponde aos níveis mais altos de umidade (ITU), e a distribuição da declividade pela área, que também está ligado à sua influência no mapa final (Figura 3).

Considerando o MPO com melhor desempenho da AUC (74,86%) como sendo o mapa MPOb, que obteve risco baixo (0,154; Tabela 1) e compensação média (0,407; Tabela 1), resultou em 84,06% da área classificada como alta prioridade; 8,79% em média; 0,08% em baixa; 7,05% em muito alta e 0,02% muito baixa prioridade.

Quando atribuído o maior peso de ordenação ao critério mais influente e importante (declividade, Figura 2), o desempenho da AUC (Tabela 2) foi igual a 57% (MPOh), e houve distribuição maior nas classes de prioridade baixa (51,99%) e muito baixa (28,83%), para a fazenda A, e aumento nas classes prioritárias baixa (38,93%) e média (29,45%), para a fazenda B. Ressalta-se que o risco foi igual a 82,5% (Tabela 1).

Em relação as outras alternativas deste cenário, suas avaliações demonstraram que não levaram à definição de áreas prioritárias de acordo com o objetivo deste estudo, tendo mostrado influência excessiva de alguns critérios no mapa final, como consequência não se obteve uma associação entre o mapa final, com os critérios e a realidade observada em campo, além de terem apresentado um baixo valor de acurácia a partir da análise estatística AUC-ROC.

#### **4. Discussão**

Foi realizada uma avaliação comparativa entre os métodos MPO e CLP na priorização de áreas para alocação de estradas florestais, levando em consideração o objetivo do estudo, os critérios e a ordem de importância previamente definidos para eles no capítulo anterior. É importante ressaltar que não foram encontrados estudos que tenham testado o método MPO para o mesmo objetivo deste estudo.

Como mencionado por Malczewski e Rinner (2015), um conjunto de critérios deve possuir algumas propriedades para representar adequadamente a natureza multicritério do problema de decisão. Uma forma para adequar, é controlar a influência do critério. Já a maneira de controlar a influência de um critério, é por meio de pesos de ordenação (Malczewski et al., 2003), ou propor um novo conjunto de valores para os pesos dos fatores, mantendo a ordem de importância previamente definidos para eles.

A análise de sensibilidade evidenciou que os critérios para as duas fazendas obtiveram o mesmo comportamento, sendo a ordem do menos para o mais influente, DRH, erodibilidade, ITU e declividade. O critério declividade apresentou influência intrínseca, sendo o primeiro na ordem de ranqueamento dos fatores, como consequência da distribuição espacial de suas feições homogeneamente por toda a paisagem de estudo, este foi também o mais influente (Figuras 2 e 3). Porém, ressalta-se que não houve predominância de suas feições no mapa final, assim como os outros critérios, mesmo DRH que obteve menor influência (Figuras 2 e 3), mas foi o segundo mais importante e ITU que obteve menor importância, mas foi o segundo mais influente.

Explorar o espaço de estratégia de decisão é capaz de fornecer diferentes cenários para o objetivo proposto. Este é um tópico importante na AMC que não deve ser negligenciado (Billaud et al., 2020), especialmente porque pode ser facilmente combinado com o método existente, usado para calcular os pesos dos critérios (Eldrandaly, 2013; Mokarram e Mirsoleimani, 2018; Kazemi-Beydokhti et al., 2019; Zabihi et al., 2019).

Considerando o maior valor de AUC do método MPO, para a fazenda A, o MPOa apresentou-se como melhor alternativa, considerando que obteve a maior AUC (77,79%) em comparação com os outros MPO analisados, sem considerar o nível de influência dos critérios,

e a necessidade de controlá-los ou não. A distribuição do peso de ordenação, se deu maior no critério menos importante, e foi o segundo mais influente (ITU).

Quando considerada as áreas em cada classe, em comparação ao CLP houve um aumento da classe 4 (Tabela 3), correspondente à classe alta, diminuindo os valores nas classes médias. Em relação à curva AUC, o CLP obteve uma melhor acurácia (0,8831; Tabela 2), e se mostrou um mapa mais condizente com o que se tem na realidade do campo, em relação ao resultado do melhor desempenho do método MPO.

Para a fazenda B, o MPOb apresentou-se como melhor alternativa, comparado aos outros MPO, com uma AUC igual a 74,86% (Tabela 2). Assim como na fazenda A, para o MPOb a distribuição dos pesos de ordenação foi maior para o critério menos importante, ou seja, ITU. A respeito da distribuição da área nas cinco classes de prioridade, mais de 90% da área foi classificada como alta e muito alta prioridade (Tabela 3).

Quando considerados os maiores valores de ordenação para o critério declividade, obteve-se um risco alto (0,825; Tabela 1) e baixa compensação (0,328; Tabela 1), de acordo com os resultados do MPOh. A concentração de áreas nas classes baixa e muito baixa prioridade para fazenda A, e de média e baixa prioridade para a fazenda B (Figura 5, Tabela 3), vai em discordância com o comportamento esperado do critério declividade.

Dado que foi considerado o critério de declividade como o mais influente e importante, e a maior parte da área apresentou baixos valores de declividade, era esperado um aumento de áreas nos níveis de prioridade mais altos. Ressaltam-se que os valores da curva AUC também foram inferiores em comparação ao melhor desempenho do MPO da fazenda A (MPOa) e da fazenda B (MPOb).

Malczewski et al. (2003), destacaram que aumentando o valor do risco de 0 para 1, há um aumento no nível de compensação entre os critérios. Isso implica que as maiores probabilidades (pesos de ordenamento) são atribuídas aos critérios de classificação mais alta em um determinado local. Como resultado, o tamanho das áreas que poderiam ser recomendadas como prioritárias, tornam-se gradualmente distribuídas (por classes) na paisagem, como observado na Tabela 3.

Os piores desempenhos da AUC para a fazenda A, foram dos MPOe (44,89%) e MPOf (47,96%), que obtiveram valores abaixo de 0,5 e portanto, o valor da acurácia não é estatisticamente significativo, ou seja, os critérios não estariam sendo representados no mapa final. Para a fazenda B, não houve valores não significativos estatisticamente, sendo o menor valor de AUC encontrado, o do MPOd com AUC igual a 56,34% (Tabela 2).

Desconsiderando o MPOa da fazenda A, e MPOb da fazenda B, que obtiveram maiores valores de AUC, as outras alternativas não promoveram a definição de áreas prioritárias de acordo com o objetivo deste estudo, tendo alguns mapas mostrado influência excessiva de alguns critérios no mapa final, como consequência não se obteve uma associação entre o mapa final, com os critérios e a realidade aferida em campo.

Para as fazendas, a alternativa CLP propôs uma solução para a priorização de áreas considerando todos os critérios e pesos definidos, o que foi confirmado pela acurácia da análise estatística, no qual a fazenda A obteve uma AUC igual a 88,31%, e a fazenda B de 82,85%. De acordo com os autores Falah et al. (2019); Kanani-Sadat et al. (2019); Chukwuma et al. (2021), a relação quantitativo-qualitativa que existe entre a AUC e a taxa de previsão, foi classificada como muito boa, que é dada a classificação de valores entre 0,8 a 0,9; o que denota que os critérios estão sendo representados no mapa final.

A análise de sensibilidade elucidou que tanto o ranqueamento proposto para os mapas de critérios, como a alternativa (solução) inicialmente proposta, para o processo de tomada de decisão, apresentando robustez ao modelo decisório.

Neste estudo, foi observado que o modelo que empregou o método da CLP apresentou melhor desempenho em comparação com o modelo que utilizou o método MPO para ambas as fazendas (Figura 4, Tabela 2), demonstrando alta precisão na determinação das áreas prioritárias. Malczewski e Rinner (2015), relataram ser comum o uso do método CLP, e que uma das principais vantagens do método, é que ele pode ser facilmente implementado dentro do ambiente SIG, usando operações de álgebra de mapa, porém, a falta de conhecimento necessário para sua aplicação, resulta em soluções inadequadas aos objetivos dos modelos de decisão.

O método também é intuitivamente atraente para aqueles envolvidos nos procedimentos de tomada de decisão/avaliação (Malczewski, 2018), porém, as suposições por trás da CLP são muitas vezes muito difíceis de aplicar no mundo real (Malczewski, 2000).

Um fator que contribuiu para uma maior precisão dos resultados do CLP em comparação ao MPO, para ambas as fazendas, é o nível de detalhamento do banco de dados, como observado em estudos anteriores de Valente et al. (2017), Silva et al. (2017), Américo (2018) e Valente et al. (2021), onde a resolução espacial foi de cinco metros, proporcionando um detalhamento mais refinado dos critérios, o que teve um impacto positivo na aplicação do método CLP. Isso pode ser constatado por meio da análise estatística ROC, a qual evidenciou o desempenho superior do CLP em relação ao MPO para as condições deste estudo.

O método da AMC é flexível, e facilita uma melhor compreensão dos padrões alternativos de priorização das áreas. A seleção do método de avaliação multicritério é um problema importante, porque a alternativa identificada como a melhor, depende da decisão da regra utilizada no processo decisório (Valente e Vettorazzi, 2008). Ou seja, mesmo que o problema de decisão seja perfeitamente estruturado, o uso de um método inadequado pode levar a decisões que não podem ser justificadas.

O planejamento espacial voltado às estradas florestais está diretamente relacionado com a tomada de decisões e estratégias, além dos resultados do planejamento que diferirão claramente dependendo dos critérios utilizados e das características de cada paisagem. Os resultados obtidos neste estudo, demonstram que uma exploração completa do espaço de decisão-estratégia permite obter uma melhor compreensão de como os critérios com diferentes pesos se combinam para produzir o mapa final de priorização.

## **5. Conclusão**

Este estudo traz a aplicação da avaliação multicriterial, por meio do método da média ponderada ordenada (MPO), para a definição de áreas prioritárias para alocação de estradas florestais. Foi possível obter uma gama de alternativas (soluções) aplicando o MPO, em diferentes níveis de risco e compensação, além disso, incluindo os resultados obtidos pelo método de combinação linear ponderada (CLP).

As oito alternativas, resultantes da aplicação do MPO, diferiram quanto à distribuição espacial das classes prioritárias, tendo apresentado bom desempenho somente o MPOa e MPOb, para a fazenda A e B, respectivamente. Alcançar mais de uma solução é um aspecto positivo do método MPO, que pode apoiar a geração de alternativas com diferentes níveis de compensação dentro em uma faixa de risco.

Porém, para este estudo e para estas áreas, o método CLP se mostrou com melhor desempenho em relação à MPO, oferecendo melhor priorização das áreas, considerando as regras pré-determinadas, em termos de critérios e a sua importância, além do detalhamento do banco de dados, constatando adequação do mapa com a realidade da paisagem, a partir da análise de sensibilidade.

A coerência entre os pesos de importância a partir do processo hierárquico analítico (AHP), e a estruturação do banco de dados com alta resolução espacial, adicionou robustez ao processo e a solução que o método CLP trouxe.

De acordo com esse estudo, dentre os critérios propostos, todos se mostraram capazes de identificar a prioridade das áreas das fazendas com o objetivo proposto, ou seja, áreas com

menores declividades, menos valores de erodibilidade, menores valores de ITU, e distantes da rede hidrográfica se mostraram mais prioritárias para se alocar as estradas florestais.

Por fim, pode-se destacar que a priorização de áreas leva à otimização de recursos, e ações de manejo, visando à conservação do solo e da água. Com adequada proposta de alocação das estradas florestais em lugares a serem determinados, garantirá aos empreendimentos florestais a sustentabilidade, pois a metodologia proposta vai garantir trafegabilidade e acesso aos talhões durante todo o ano.

Dentro deste contexto, é possível identificar áreas mais adequadas com requisitos específicos, preferências para as atividades florestais de colheita, manutenção, entre outros usos diversos. Isso porque o processo decisório considera as características intrínsecas (importância e influência) dos critérios na paisagem.

## Referências

Akay, A. O., Akgul, M., Demir, M. Determination of temporal changes on forest road pavement with terrestrial laser scanner. **Fresenius Environ. Bull**, v.27, n.3, p.1437–1448, 2018.

Akay, A. O., Akgul, M., Demir, M., Acar, H. H. Analysis of factors associated with the amount of forest road reconstruction activity in Turkey: autoregressive distributed lag modelling approach. **For. Ecol. Manag.**, v.458, 117800, 2020. doi:10.1016/j.foreco.2019.117800.

Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., Guignard, M., Weintraub, A. Risk management for forestry planning under uncertainty in demand and prices R. **Eur. J. Oper. Res.**, v.267, n.3, p. 1051–1074, 2018. doi:10.1016/j.ejor.2017.12.022.

Álvarez-Miranda, E., Garcia-Gonzalo, J., Pais, C., Weintraub, A. A multicriteria stochastic optimization framework for sustainable forest decision making under uncertainty. **For. Policy Econ.**, v.103, p. 112–122, 2019. doi:10.1016/j.forpol.2018.03.006.

Américo. **Microplanning of forest roads through geotechnologies**, 48f, 2018, (Masters dissertation). Federal University of São Carlos, Sorocaba campus.

Billaud, O., Soubeyrand, M., Luque, S., Lenormand, M. Comprehensive decision-strategy space exploration for efficient territorial planning strategies. Computers, **Environment and Urban Systems**, v.83, 101516, 2020. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2020.101516

Bont, L. G., Fraefel, M., Fischer, C. A spatially explicit method to assess the economic suitability of a forest road network for timber harvest in steep terrain. **Forests**, v.9, n.4, p. 1-21, 2018. doi: 10.3390/f9040169.

Chukwuma, E. C., Okonkwo, C. C., Ojediran, J. O., Anizoba, D. C., Ubah, J. I., Nwachukwu, C. P. A GIS based flood vulnerability modelling of Anambra State using an integrated IVFRN-DEMATEL-ANP model. **Heliyon**, v.7, n.9, e08048, 2021. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08048.

Comber, A., Carver, S., Fritz, S., McMorran, R., Washtell, J., Fisher, P. Different methods, different wilds: Evaluating alternative mappings of wildness using fuzzy MCE and Dempster-Shafer MCE. *Computers, Environment and Urban Systems*, v.34, n.2, p.142–152, 2010.

Costello, S. B., Snaith, M.S., Kerali, H. G. R., Tachtsi, L. V., Ortiz-Garcia, J. J. Stochastic model for strategic assessment of road maintenance. **Proc. Inst. Civ. Eng. Transp.**, v.158, n.4, p.203-211, 2005. doi: 10.1680/tran.2005.158.4.203.

Crosetto, M., Tarantola, S. Uncertainty and sensitivity analysis: Tools for GIS-based model implementation. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 15, n.5, p.415–437, 2001. doi: 10.1080/13658810110053125

de Carmo, F. C. A., Fiedler, N. C., da Lopes, E. S., Pereira, D. P., Marin, H. B., da Silva, E. N. Análise da densidade ótima de estradas florestais em propriedades rurais. **Cerne**, v.19, n.3, p.451–459, 2013. doi: 10.1590/S0104-77602013000300012.

dos Santos, P. A. V. H., da Silva, A. C. L., Arce, J. E., Augustynczyk, A. L. D. A mathematical model for the integrated optimization of harvest and transport scheduling of forest products. **Forests**, v.10, n.12, 1110, 2019. doi: 10.3390/F10121110.

Eastman, J. R. **Idrisi for Windows, Version 2.0: Tutorial Exercises**. Graduate School of Geography-Clark University, Worcester, 1997.

Eastman, J. R. **Idrisi 3.2** – Release 2: Tutorial. Worcester, Massachusetts: Clark University, 2001.

Eldrandaly, K. A. Exploring multicriteria decision strategies in GIS with linguistic quantifiers: An extension of the analytical network process using ordered weighted averaging operators.

**International Journal of Geographical Information Science**, v.27, n.12, p.2455-2482, 2013.  
doi: 10.1080/13658816.2013.815356

Falah, F., Rahmati, O., Rostami, M., Ahmadisharaf, E., Daliakopoulos, I. N., Pourghasemi, H. R. Artificial neural networks for flood susceptibility mapping in data-scarce urban areas. *In: Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*. Elsevier Inc, 2019.

Ferenčík, M., Kardoš, M., Allman, M., Slatkovská, Z. Detection of forest road damage using mobile laser profilometry. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.166, 105010, 2019.  
doi: 10.1016/j.compag.2019.105010

França, L. C. de J., Júnior, F. W. A., Silva, C. S. J., Monti, C. A. U., Ferreira, T. C., Santana, C. J. de O., Gomide, L. R. Forest landscape planning and management: A state-of-the-art review, **Trees, Forests and People**, v.8, 100275, 2022. doi: 10.1016/j.tfp.2022.100275.

Gomes, V. de S., Monti, C. A. U., Silva, C. S. J. e, Gomide, L. R. Operational harvest planning under forest road maintenance uncertainty. **Forest Policy and Economics**, v.131, 102562, 2021. doi: 10.1016/j.forpol.2021.102562

Gumus, S., Acar, H. H., Toksoy, D. Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting. **Environ. Monit. Assess.**, v.142, n. 1-3, p. 109–116, 2008. doi: 10.1007/s10661-007-9912-y.

Hayati, E., Majnounian, B., Abdi, E., Sessions, J., Makhdoum, M., 2013. An expert-based approach to forest road network planning by combining Delphi and spatial multicriteria evaluation. **Environ. Monit. Assess.**, v.185, n.2, p.1767-1776. doi: 10.1007/s10661-012-2666-1.

Jaafari, A., Najafi, A., Rezaeian, J., Sattarian, A., Ghajar, I. Planning road networks in landslide-prone areas: a case study from the northern forests of Iran. **Land Use Policy**, v.47, p.198–208, 2015. doi: 10.1016/j.landusepol.2015.04.010.

Jiang, H., Eastman, J. R. Application of fuzzy measures in multicriteria evaluation in GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v.14,n.2, p.173-184, 2000.

Kanani-Sadat, Y., Arabsheibani, R., Karimipour, F., Nasser, M. A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on GIS based hybrid multi

criteria decision-making method. **J. Hydrol.**, v.572, p.17–31, 2019. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.034

Kazama, V. S., Corte, A. P. D., Robert, R. C. G., Sanquetta, C. R., Arce, J. E., Oliveira-Nascimento, K. A., DeArmond, D. Global review on forest road optimization planning: Support for sustainable forest management in Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v.492, 119159, 2021. doi: 10.1016/j.foreco.2021.119159.

Kazemi-Beydokhti, M., Abbaspour, R. A., Kheradmandi, M., Bozorgi-Amiri, A. Determination of the physical domain for air quality monitoring stations using the ANP MPO method in GIS. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.191 (S2), 299, 2019. doi:10.1007/s10661-019-7422-3

Keramati, A., Lu, P., Sobhani, A., Haji Esmaili, S.A. Impact of forest road maintenance policies on log transportation cost, routing, and carbon-emission tradeoffs: oregon case study. **J. Transp. Eng. Part A Syst.**, v.146, 04020028, 2020. doi: 10.1061/jtepbs.0000335.

Lenormand, M. Generating MPO weights using truncated distributions. **International Journal of Intelligent Systems**, v.33, n.4, p.791-801, 2018. doi:10.1002/int.21963

Malczewski, J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v.20, n.7, p. 703-726, 2006. doi:10.1080/13658810600661508

Malczewski, J. On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approaches. **Transactions in GIS**, v.4, p.5–22, 2000. doi:10.1111/1467-9671.00035

Malczewski, J. Multicriteria Analysis. **Comprehensive Geographic Information Systems**, p.197–217, 2018. doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.09698-6

Malczewski, J., Chapman, T., Flegel, C., Walters, D., Shrubsole, D., Healy, M. A. GIS-multicriteria evaluation with Ordered Weighted Averaging (MPO): Developing management strategies for rehabilitation and enhancement projects in the Cedar Creek watershed, Ontario, Canada. **Environment and Planning A**, v.35, p.1769–1784, 2003. doi:10.1068/a35156

Malczewski, J., Rinner, C. **Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science**. London: Springer, 2015. 331p.

Meignan, D., Frayret, J. M., Pesant, G. Interactive planning system for forest road location. **Journal Of Heuristics**, v. 21, n. 6, p.789-817, 2015.

Mokarram, M., Mirsoleimani, A. Using Fuzzy-AHP and order weight average (OWA) methods for land suitability determination for citrus cultivation in ArcGIS (Case study: Fars province, Iran). **Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications**, 508, 506–518, 2018. doi: 10.1016/j.physa.2018.05.062

Najafi, A., Richards, E. W. Designing a forest road network using mixed integer programming. **Croat. J. For. Eng.**, v.34, p.17–30, 2013.

Ng, M. W., Zhang, Z., Waller, S. T. The price of uncertainty in pavement infrastructure management planning: an integer programming approach. **Transp. Res. Part C Emerg. Technol.**, v.19, n.6, p.1326-1338, 2011. doi: 10.1016/j.trc.2011.03.003.

Robinson, A. P., McLarin, M., Moss, I. A simple way to incorporate uncertainty and risk into forest harvest scheduling. **For. Ecol. Manag.**, v.359, p.11–18, 2016. doi: 10.1016/j.foreco.2015.09.027.

Roise, J. P., Harnish, K., Mohan, M., Scolforo, H., Chung, J., Kanieski, B., Catts, G. P., McCarter, J. B., Posse, J., Shen, T. Valuation and production possibilities on a working forest using multi-objective programming, Woodstock, timber NPV, and carbon storage and sequestration. **Scand. J. For. Res.**, v.31, n.7, p.674–680, 2016. doi: 10.1080/02827581.2016.1220617.

Rönnqvist, M., D'Amours, S., Weintraub, A., Jofre, A., Gunn, E., Haight, R.G., Martell, D., Murray, A.T., Romero, C. Operations research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, v. 232, p. 11-40, 2015.

Saltelli, A. What is sensitivity analysis. In: Saltelli, A., Chan, K., Scott, M. (Eds.), **Sensitivity analysis**. Wiley, New York, p. 3–12, 2000.

Silva, V. A. M., Mello, K. de, Vettorazzi, C. A., Costa, D. R. da, Valente, R. A. Priority areas for forest conservation, aiming at the maintenance of water resources, through the multicriteria evaluation. **Árvore**, v.41, n.1, 2017. doi: 10.1590/1806-90882017000100019

Simonenkova, A., Simonenkov, M., Bacherikov, I. Optimization of forest road network layout problem. **IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.**, v.817, 012032, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/817/1/012032.

Stefanović, B., Stojnić, D., Danilović, M. Multicriteria forest road network planning in fire-prone environment: a case study in Serbia. **J. Environ. Plan. Manag.**, v.59, n.5, p.911–926, 2016. doi: 10.1080/09640568.2015.1045971.

Valente, R. A., de Mello, K., Metedieri, J. F., Américo, C. A multicriteria evaluation approach to set forest restoration priorities based on water ecosystem services. **Journal of Environmental Management**, v.285, 112049, 2021. doi:10.1016/j.jenvman.2021.112049

Valente, R. A., Vettorazzi, C. A. Definition of priority areas for forest conservation through the Ordered Weighted Averaging method. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.256, n.6, p.1408 – 1417, 2008. doi: 10.1016/j.foreco.2008.07.006

Valente, R.A., Petean, F. C de S., Vettorazzi, C. A. Multicritereria decision analysis for prioritizing areas for forest restoration. **Revista Cerne**, v.23, n.1, p.53-60, 2017. doi: 10.1590/01047760201723012258

Veliz, F. B., Watson, J. P., Weintraub, A., Wets, R. J. B., Woodruff, D. L. Stochastic optimization models in forest planning: a progressive hedging solution approach. **Ann. Oper. Res.**, v.232, p.259-274, 2015. doi: 10.1007/s10479-014-1608-4.

Verderame, P. M., Elia, J. A., Li, J., Floudas, C. A. Planning and scheduling under uncertainty: a review across multiple sectors. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v.49, n.9. p. 3993–4017, 2010. doi: 10.1021/ie902009k.

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. doi:10.1016/j.ecoleng.2016.05.069

Wang, Y., Hong, H., Chen, W., Li, S., Pamucar, D., Gigovic, L., Drobnjak, S., Bui, D.T., Duan, H. A hybrid GIS multicriteria decision-making method for flood susceptibility mapping at shangyou, **China. Rem. Sens.**, v.11, n.1, 62, 2019. doi: 10.3390/rs11010062

Yager, R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision-making. **IEEE Transactions Systems, Man and Cybernetics**, v.18, p. 183–190, 1988.

Zabihi, H., Alizadeh, M., Kibet Langat, P., Karami, M., Shahabi, H., Ahmad, A., Said, N. M., Lee, S. GIS Multicriteria Analysis by Ordered Weighted Averaging (MPO): TMPOrd an Integrated Citrus Management Strategy. **Sustainability**, v.11, n.4, 1009, 2019. doi: 10.3390/su11041009

## **CAPÍTULO 6: Considerações finais**

Para as condições específicas em que foi realizado o presente trabalho, o processo decisório proposto por meio da Avaliação Multicriterial (AMC), permitiu definir áreas prioritárias à alocação de estradas florestais, a partir dos critérios selecionados, os quais são de fácil elaboração e representam as características importantes da paisagem.

O critério solo, o qual é um mapa essencial para o planejamento ambiental, traz melhorias quando espacializados de forma contínua, por meio de métodos geoestatísticos, sobretudo quando agregado aos demais critérios importantes para representar estradas florestais.

A partir da avaliação da fragilidade ambiental e o entendimento do comportamento dos critérios ambientais, é possível usar como base para o planejamento florestal, especialmente de estradas, respeitando assim os mecanismos de sustentação do ecossistema.

Com outros métodos da AMC, tal como o método da média ponderada ordenada (MPO), também é possível definir áreas prioritárias para alocação de estradas florestais. Com isso é possível obter uma gama de alternativas (soluções), em diferentes níveis de risco e compensação, incluindo os resultados obtidos pelo método da combinação linear ponderada (CLP).

O método da MPO e CLP são considerados flexíveis, e fáceis de serem implementados e permite a interação de conhecimentos (pesquisadores, analistas, gestores etc.), e de características da paisagem no processo de tomada de decisão.

A possibilidade de introduzir vários critérios, por meio de diferentes estruturas de ponderação específicas, diferentes agentes decisores, com diferentes métodos, com simulação de diferentes alternativas, e análise de sensibilidade, conferem às técnicas da AMC características atrativas na construção de modelos de decisão.

A utilização de ambos os métodos leva a necessidade de algumas considerações sobre eles. O primeiro fato a ser considerado, é que estes são apenas dois dentre outros métodos possíveis de se aplicar para o objetivo deste estudo. A motivação nestes dois modelos, reside na facilidade de aplicação e comparação dos resultados.

Destaca-se que para utilização desse método, deve-se ter um bom conhecimento da paisagem a ser estudada, para que se defina com coerência os pesos de compensação, de ordenação e a ponderação das alternativas propostas.

A análise de sensibilidade, subsidiada por uma análise estatística de correlação até então utilizada somente na área médica, constitui-se em uma metodologia apropriada para avaliação

dos critérios, em relação a influência que exercem no processo decisório. Ela permite, desta forma, identificar os critérios que devem integrar a tomada de decisão, bem como identificar a solução adequada considerando o objetivo do estudo.

A execução dos métodos, em conjunto com as ferramentas de análise como a sensibilidade, demonstra que no final do processo, pode-se obter uma segurança na tomada de decisão, e na escolha do melhor método para o problema de alocação de estradas.

Para este estudo, a espacialização de áreas prioritárias (i.e. estradas), a partir do método CLP se mostra com melhor desempenho em comparação ao MPO, e corresponde com o que foi definido inicialmente. A coerência apresentada entre os pesos de fator, resolução do banco de dados, o conhecimento aplicado, e a solução final estatisticamente significativa, conferem robustez ao processo de tomada de decisão com o método CLP.

É importante ressaltar que o conjunto de critérios selecionados para construção do modelo decisório, não está fechado, e que tão somente esses critérios são representativos da prioridade ou criticidade das estradas florestais. Portanto, critérios como, por exemplo, de transporte, colheita, silvicultura, entre outros, podem integrar o conjunto de critérios de decisão, dependendo do objetivo do planejamento florestal que se deseja obter. Ressalta-se que o uso de outros indicadores, métodos, ou critérios, resultarão em diferentes soluções.

Por fim, o modelo de decisão para o objetivo aqui proposto, leva à otimização de recursos e ações, visando um manejo sustentável. Dentro deste contexto, é possível identificar áreas mais adequadas, com requisitos específicos, preferências para as atividades florestais de colheita, manutenção entre outros objetivos de uso, que servirão de base para os gestores.