



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JOSÉ RENATO AZEDIAS CAMPOS

**DENSIDADE ÓTIMA DE ESTRADAS APLICADA AO TRANSPORTE DE TORAS
CURTAS EM FLORESTAS PLANTADAS**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

JOSÉ RENATO AZEDIAS CAMPOS

**DENSIDADE ÓTIMA DE ESTRADAS APLICADA AO TRANSPORTE DE TORAS
CURTAS EM FLORESTAS PLANTADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientador: Prof. Dr. Nilton César Fiedler
Coorientador: Prof. Dr. Antonio Henrique Cordeiro Ramalho

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

C198d Campos, José Renato Azedias, 1995-
Densidade ótima de estradas aplicada ao transporte de toras
curtas em florestas plantadas / José Renato Azedias Campos. -
2022.
85 f. : il.

Orientador: Nilton César Fiedler.
Coorientador: Antonio Henrique Cordeiro Ramalho.
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias.

1. Logística florestal. 2. Geoprocessamento. 3. Operações
florestais. I. Fiedler, Nilton César. II. Ramalho, Antonio
Henrique Cordeiro. III. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630

DENSIDADE ÓTIMA DE ESTRADAS APLICADA AO TRANSPORTE DE TORAS CURTAS EM FLORESTAS PLANTADAS

José Renato Azedias Campos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovado em 14 de dezembro de 2022.

Documento assinado digitalmente
 FLAVIO CIPRIANO DE ASSIS DO CARMO
Data: 15/12/2022 09:44:23-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Flávio Cipriano de Assis do Carmo (Examinador externo)
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 DANILO SIMOES
Data: 14/12/2022 15:01:23-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Danilo Simões (Examinador externo)
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências
Aronômicas. Botucatu - SP

Documento assinado digitalmente
 WESLEN PINTOR CANZIAN
Data: 14/12/2022 13:36:03-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Dr. Weslen Pintor Canzian (Examinador externo)
Suzano SA

PROTOCOLO DE ASSINATURA

 O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por NILTON CESAR FIEDLER - SIAPE 1278958 Departamento de Ciências Florestais e da Madeira - DCFM/CCAE Em 15/12/2022 às 10:20

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/622542?tipoArquivo=0>

Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedicatória

A Deus, pela vida.

Aos meus pais, Antônio Sergio (in memoriam) e Ana Claudia pelo incentivo, carinho, apoio, bons exemplos e amor com que me prepararam para a vida.

A Raquel, pelo companheirismo, incentivo e apoio.

Dedico

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita.”

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e que sempre me guiou durante todos esses anos.

Aos meus pais, Antônio Sergio (in memoriam) e Ana Claudia, meus irmãos, e a Raquel pelo apoio, companheirismo, paciência, compreensão, incentivo e confiança.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nilton César Fiedler, por ter me incentivado e ter ofertado a chance de realizar o mestrado sob sua orientação, pelos conhecimentos e conselhos oferecidos, e pelo apoio durante a realização do trabalho.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais, por todo conhecimento compartilhado.

Aos demais servidores e alunos do Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela prestação de serviços, disposição e atendimento quando solicitado.

Aos integrantes do NUPEME, NUPEMASE e do LaMFlor, pela realização dos trabalhos de pesquisa durante a Graduação e Pós-Graduação.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, pela prontidão, dedicação e por todas as considerações, prof. doutores Antonio Henrique, Danilo, Flávio, Saulo e Weslen.

A toda a turma de Floresta 2013/1 da UFES, demais companheiros Floresteiros e aos grandes amigos que fiz ao longo da minha Graduação e Pós-Graduação.

Aos amigos, familiares e aos integrantes e ex-integrantes da República Katapulta de Alegre (ES), pelos momentos inesquecíveis de muitas risadas, gerando muitas histórias para contar.

Aos amigos que fiz nas cidades que estudei e morei: Piacatuba, Rio Pomba, Alegre e Jerônimo Monteiro.

Aos amigos que fiz nas cidades que trabalhei e morei: Jacareí, São José dos Campos, Três Lagoas, Aracruz, Sete Lagoas, Campo Grande e Ribas do Rio Pardo.

Aos amigos da empresa florestal, pelo apoio e disponibilidade na obtenção de dados, em especial a gerência de logística florestal.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGCF/UFES) e à empresa florestal por ceder a área de estudo.

A Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e aos professores que tive ao longo da minha vida.

Todos foram importantes nesta caminhada, portanto o meu muito obrigado.

RESUMO

CAMPOS, José Renato Azedias. **Densidade ótima de estradas aplicada ao transporte de toras curtas em florestas plantadas**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Nilton César Fiedler. Coorientador: Prof. Dr. Antonio Henrique Cordeiro Ramalho.

Para garantir o abastecimento fabril é necessário o adequado planejamento das operações, principalmente das estradas florestais. A densidade ótima de estradas, atrelada ao uso de geotecnologias e à produtividade da floresta, é um parâmetro crucial para tomadas de decisão. Com isso, objetivou-se nesse trabalho, a definição dos pontos críticos para o transporte de madeira, juntamente com a densidade do cenário atual das vias, além de determinar a densidade ótima de estradas florestais em diferentes cenários de volume médio individual da floresta e combinações veiculares de carga propostos. A área de estudo está localizada em Ribas do Rio Pardo, Mato Grosso do Sul. Inicialmente, através de ferramentas de geoprocessamento, procedeu-se com a análise da classificação das estradas e determinação de pontos críticos ao transporte de madeira para cada tipo de combinações veiculares de carga, sendo eles bitrem, tritrem e hexatrem, associados as suas limitações quanto a declividade, acima de 12%, acima de 8% e acima de 5%, respectivamente. Posteriormente, gerou-se a densidade ótima de estradas por meio da minimização do somatório dos custos totais para os nove diferentes cenários de volume médio individual (0,15, 0,20 e 0,25 m³.árvore⁻¹), correlacionados a diferentes combinações veiculares de carga (bitrem, tritrem e hexatrem). Para a analisar a capacidade de estocagem de madeira nas estradas florestais, foi necessário efetuar o cálculo de volume de madeira por metro linear, com base em dimensões de pilha padrão utilizadas na empresa. Após essa etapa obteve-se também o tamanho mínimo e máximo dos talhões, com base na densidade ótima de estradas. Com todo o proposto, foi possível verificar que 0,9% das estradas da área estão localizadas em declividade acima de 12%, ou seja, ponto crítico para tráfego de bitrem. 3,3% das estradas encontram-se em pontos críticos, com declividade superior à 8%, para a movimentação de tritrem e 17,3% das estradas estão em locais considerados críticos

(declividade > 5%) para o deslocamento de hexatrem. Observou-se que a densidade atual de estradas da área é de 52,72 m.ha⁻¹. A variação da densidade ótima obtida nos cenários avaliados foi de 19,57 e 27,61 m.ha⁻¹, correspondendo ao cenário de volume médio 0,15 m³.árvore⁻¹ associado ao hexatrem e ao cenário de volume médio individual 0,25 m³.árvore⁻¹ relacionado ao bitrem, respectivamente. Os cenários com volume médio individual 0,15 m³.árvore⁻¹, associado a bitrem e tritrem, assumiram valores de 25,57 e 23,68 m.ha⁻¹ de densidade ótima, respectivamente. Já os cenários de volume médio individual 0,20 m³.árvore⁻¹ relacionado a bitrem, tritrem e hexatrem, apresentaram 26,16, 24,46 e 20,45 m.ha⁻¹ de densidade ótima. O volume médio individual 0,25 m³.árvore⁻¹, ligados a tritrem e hexatrem, respectivamente, tiveram densidade ótima de 26,91 e 22,06 m.ha⁻¹. Os cenários estudados não apresentaram restrição quanto a capacidade de estocagem de madeira nos cenários ótimos, exceto, no cenário de hexatrem com volume médio individual de 0,25 m³.árvore⁻¹. Quanto aos tamanhos ideais de talhões, percebe-se uma variação entre 18 a 51 ha, correspondendo aos cenários de bitrem com volume médio 0,15 m³.árvore⁻¹ e hexatrem com volume médio 0,25 m³.árvore⁻¹. As ferramentas propostas neste estudo, alcançaram as expectativas esperadas. O estudo de pontos críticos, atrelado ao tipo de combinações veiculares de carga, apresentou eficiência quanto ao mapeamento de pontos de atenção. O cálculo da densidade ótima de estradas foi eficiente como ferramenta na redução de custos operacionais, analisando a influência do volume médio individual e diferentes combinações veiculares de carga. A pesquisa propõe e recomenda metodologias de baixo custo e fácil aplicação para tomada de decisão do gestor florestal.

Palavras-chave: Logística florestal, geoprocessamento, operações florestais.

ABSTRACT

CAMPOS, José Renato Azedias. **Optimal road density applied to the transport of short logs in planted forests**. 2022. Dissertation (Master's in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Mr. D.Sc. Nilton César Fiedler. Co-advisor: Mr. D.Sc. Antonio Henrique Cordeiro Ramalho.

To guarantee the factory supply, adequate planning of operations is necessary, especially for forest roads. Optimal road density, linked to the use of geotechnologies and forest productivity, is a crucial parameter for decision making. With this, the objective of this work was to define the critical points for the transport of wood, together with the density of the current scenario of the roads, in addition to determining the optimal density of forest roads in different scenarios of individual average volume of the forest and combinations proposed freight vehicles. The study area is in Ribas do Rio Pardo city, Mato Grosso do Sul state. Initially, using geoprocessing tools, we proceeded with the analysis of the classification of the roads and the determination of critical points for the transport of wood for each type of vehicular load combinations, being they two-train, three-train and six-train, associated with their limitations in terms of slope, above 12%, above 8% and above 5%, respectively. Subsequently, the optimal road density was generated by minimizing the sum of total costs for the nine different individual average volume scenarios (0.15 , 0.20 and $0.25 \text{ m}^3.\text{tree}^{-1}$), correlated to different load vehicular combinations (two-train, three-train and six-train). To analyze the wood storage capacity on forest roads, it was necessary to calculate the volume of wood per linear meter, based on standard pile dimensions used in the company. After this stage, the minimum and maximum size of the plots was also obtained, based on the optimal density of roads. With all the proposal, it was possible to verify that 0.9% of the roads in the area are located on slopes above 12%, that is, a critical point for two-train traffic. 3.3% of the roads are at critical points, with a slope greater than 8%, for the movement of three-train and 17.3% of the roads are in places considered critical (decline $> 5\%$) for the movement of six-train. It was observed that the current density of roads in the area is $52.72 \text{ m}.\text{ha}^{-1}$. The variation in the optimal density obtained in the evaluated scenarios was 19.57 and $27.61 \text{ m}.\text{ha}^{-1}$, corresponding to the average volume scenario $0.15 \text{ m}^3.\text{tree}^{-1}$ associated with the six-

train and the individual average volume scenario 0, 25 m³.tree⁻¹ related to the two-train, respectively. Scenarios with average individual volume of 0.15 m³.tree⁻¹, associated with two-train and three-train, assumed optimal density values of 25.57 and 23.68 m.ha⁻¹, respectively. The individual average volume scenarios 0.20 m³.tree⁻¹ related to two-train, three-train and six-train, presented 26.16, 24.46 and 20.45 m.ha⁻¹ of optimal density. The average individual volume 0.25 m³.tree⁻¹, connected to three-train and six-train, respectively, had optimal density of 26.91 and 22.06 m.ha⁻¹. The scenarios studied did not present restrictions regarding the wood storage capacity in the optimal scenarios, except for the six-train scenario with an average individual volume of 0.25 m³.tree⁻¹. As for the ideal sizes of plots, a variation between 18 and 51 ha can be seen, corresponding to the two-train scenarios with an average volume of 0.15 m³.tree⁻¹ and the six-train with an average volume of 0.25 m³.tree⁻¹. The tools proposed in this study reached the expected expectations. The study of critical points, linked to the type of vehicular load combinations, showed efficiency in terms of mapping points of attention. The calculation of the optimal road density was efficient as a tool to reduce operational costs, analyzing the influence of individual average volume and different vehicular load combinations. The research proposes and recommends low-cost and easy-to-apply methodologies for forest manager decision-making.

Keywords: Forest logistics, geoprocessing, forestry operations.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVO.....	19
2.1. Objetivo Geral	19
2.2. Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Setor Florestal Brasileiro	20
3.2. Geotecnologias Aplicadas ao Setor Florestal	22
3.3. Colheita Florestal	23
3.4. Extração Florestal	25
3.5. Estradas Florestais	27
3.5.1. Classificação das Estradas	27
3.5.2. Construção e Manutenção das Estradas	28
3.5.3. Densidade Ótima de Estradas	30
3.6. Transporte Florestal	32
4. MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1. Caracterização da Área de Estudo	36
4.2. Caracterização das Combinações Veiculares de Carga (CVC) no Transporte Florestal	37
4.2.1. CVC do Tipo Bitrem	37
4.2.2. CVC do Tipo Tritrem	38
4.2.3. CVC do Tipo Hexatrem.....	38
4.3. Obtenção dos Dados e Análises	39
4.3.1. Tipos de Solo	39
4.3.2. Uso e ocupação do Solo	39
4.3.3. Declividade	39
4.4. Análise de Estradas	40
4.4.1. Classificação das Estradas.....	40
4.4.2. Determinação da Declividade das Estradas	41

4.5. Sistema de Colheita Florestal e Transporte de Madeira	42
4.6. Determinação dos Custos Operacionais	43
4.6.1. Estradas Florestais	43
4.6.2. Extração Florestal	45
4.6.3. Perda de Área Produtiva.....	47
4.7. Determinação da Densidade Ótima de Estradas	48
4.8. Determinação da Capacidade de Estocagem da Madeira	50
4.9. Determinação do Talhonamento em função da DE	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
5.2. Tipo, Uso e Ocupação do Solo	53
5.2. Análise de Declividade da Área	55
5.3. Análises de Estradas	57
5.3.1. Classificação das estradas da área de estudo	57
5.3.2. Determinação de pontos críticos do transporte florestal	58
5.4. Custos Operacionais e Densidade de Estradas.....	62
5.5. Tamanho do Talhão em Função da DE	73
6. CONCLUSÕES	75
7. REFERÊNCIAS.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais fatores que influenciam a extração florestal e seu tipo de correlação.....	26
Tabela 2 - Matriz do transporte de cargas por modal logístico.	32
Tabela 3 - Classificação da condição ideal e de risco operacional das CVC no transporte florestal.....	37
Tabela 4 - Classes de declividade e tipos de relevo.	40
Tabela 5 - Classificação das estradas florestais na fazenda de estudo, Ribas do Rio Pardo, MS.	41
Tabela 6 - Cenários de estudo relacionando o tipo de veículo ao VMI da floresta. ..	43
Tabela 7 - Fator de eficiência das estradas florestais e a descrição.....	47
Tabela 8 - Variáveis físicas e financeiras referentes a densidade atual, densidade ótima e densidade de estradas em função da capacidade de estocagem nos diferentes cenários de VMI e CVC de transporte florestal.	63
Tabela 9 - Tamanho mínimo e máximo dos talhões com base no espaçamento ótimo de estradas nos diferentes cenários de VMI e CVC.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma geral da cadeia produtiva florestal.....	21
Figura 2 - Mapa de localização da fazenda de estudo, em Ribas do Rio Pardo, MS.	36
Figura 3 - Desenho técnico de um bitrem florestal.	38
Figura 4 – Desenho técnico de um tritrem florestal.	38
Figura 5 - Desenho técnico de um hexatrem florestal.	39
Figura 6 – Máquina de extração adotada na empresa florestal.....	42
Figura 7 – Pilha de madeira observada para definição da capacidade de estocagem teórica.	50
Figura 8 - Mapa dos tipos de solos do município de Ribas do Rio Pardo, MS.	53
Figura 9 - Mapa do uso e ocupação do solo na fazenda de estudo, Ribas do Rio Pardo, MS.....	54
Figura 10 - Modelo Digital de Elevação da fazenda de estudo, localizada em Ribas do Rio Pardo, MS.	55
Figura 11 - Mapa de declividade da fazenda de estudo, localizada em Ribas do Rio Pardo, MS.	56
Figura 12 - Distribuição dos tipos de estradas na fazenda de estudo, localizada em Ribas do Rio Pardo, MS.....	57
Figura 13 – Mapa com a declividade das estradas com base na classificação da Embrapa.....	58
Figura 14 - Mapa com os pontos críticos ao transporte florestal, na área de estudo por tipo de CVC, localizada em Ribas do Rio Pardo, MS.....	61
Figura 15 – Relação dos diferentes VMI e CVC no custo total da madeira com base na DOE.	64
Figura 16 – Relação dos diferentes VMI e CVC na densidade de estradas com base na DOE.	65
Figura 17 - Relação entre densidade de estradas, custo de estradas, custo de extração, custo de perda de área de produtiva, produtividade da área e capacidade máxima de estocagem para Bitrem (A), Tritrem (B) e Hexatrem (C) no cenário de VMI de $0,15 \text{ m}^3.\text{árvore}^{-1}$	66

Figura 18 - Relação entre densidade de estradas, custo de estradas, custo de extração, custo de perda de área de produtiva, produtividade da área e capacidade máxima de estocagem para Bitrem (A), Tritrem (B) e Hexatrem (C) no cenário de 0,20 m ³ .árvore ⁻¹	68
Figura 19 - Relação entre densidade de estradas, custo de estradas, custo de extração, custo de perda de área de produtiva, produtividade da área e capacidade máxima de estocagem para Bitrem (A), Tritrem (B) e Hexatrem (C) no cenário de 0,25 m ³ .árvore ⁻¹	70
Figura 20 - Redução do custo total da operação nos diferentes cenários de VMI e CVC com base na DOE.....	71
Figura 21 - Redução da densidade de estradas nos diferentes cenários de VMI e CVC com base na DOE.....	72
Figura 22 - Relação entre densidade de estradas e tamanho mínimo e máximo dos talhões.....	73

1. INTRODUÇÃO

As florestas plantadas desempenham um papel fundamental na economia do Brasil, contribuindo com 2,7% do Produto Interno Bruto (PIB), fazendo com que o país tenha grande competitividade no mercado mundial de produtos florestais (MOREIRA; SIMIONI; OLIVEIRA, 2017; SOARES, 2010, IBÁ, 2021). Isso se dá por uma série de características, como as condições edafoclimáticas, a extensão territorial e o investimento em desenvolvimento tecnológico, pesquisa e inovação no setor florestal (SIMIONI et al., 2012; LAGE et al., 2016). Tendo em vista a influência dos referidos fatores, o território brasileiro é ocupado por 9,55 milhões de hectares (ha) de florestas plantadas para fins industriais. Entre as espécies, 78% dessa área é composta pelo cultivo de *Eucalyptus* spp. (IBÁ, 2021).

Os principais segmentos responsáveis pelo consumo da madeira produzida no país, são os de celulose e papel, de painéis reconstituídos e siderurgia à base de carvão vegetal (RIBASKI, 2018). Estes segmentos se destacam especialmente, em Minas Gerais com o setor siderúrgico, São Paulo e Mato Grosso do Sul com celulose e papel, e, Santa Catarina e Paraná no setor de painéis reconstituídos. Juntos estes representam aproximadamente 70% da área plantada no país (IBÁ, 2021).

Com a crescente demanda por produtos de origem florestal, principalmente para fins industriais, o planejamento florestal tornou-se ainda mais relevante para o sucesso da produção (SFEIR, 2020). Sendo assim, decisões referentes à silvicultura (implantação e condução da floresta), colheita florestal (corte e extração da madeira) e logística florestal (alocação da malha viária e transporte da madeira), dentre outros aspectos chaves no custo final da madeira, devem ser tomadas minuciosamente, antes mesmo da implantação do empreendimento (WEINTRAUB, 2007).

Considerando o planejamento florestal com ênfase em logística de transporte, destaca-se a importância da definição dos parâmetros técnicos adequados para projeção e definições quanto as estradas (ROCHA et al., 2007), visto que essas são responsáveis diretamente pelo abastecimento das fábricas. Além disso, a malha viária e o transporte florestal refletem significativamente no custo final da madeira (OLIVEIRA et al., 2010).

Segundo Moraes (2014), a classificação quanto ao tipo das estradas (primária, secundária e terciária), torna-se um meio eficiente na determinação de rotas mais seguras e eficazes no setor florestal, evitando-se assim, o tráfego de veículos em

trechos onde há um maior risco de acidentes. A classificação dessas estradas também influencia positivamente a determinação de rotas ótimas para o transporte florestal. Neste sentido, a delimitação de ferramentas eficientes de planejamento viário florestal é indispensável para o sucesso produtivo dos empreendimentos.

Para tanto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), apresentam-se como ferramentas eficientes e de suma importância para a determinação de pontos críticos, como por exemplo a declividade das estradas e otimização do transporte florestal. Isso porque o uso dessa tecnologia, combinada com as variáveis relacionadas às estradas (geometria horizontal e vertical, qualidade da pista, largura, comprimento, dentre outros), fornece informações valiosas aos gestores para aumentar a eficiência das tomadas de decisões (OLIVEIRA FILHO et al., 2005). Além disso, o SIG também possibilita o mapeamento das estradas existentes, além do cálculo de área e comprimento. Essas características são importantes para a determinação da densidade atual de estradas e posteriormente auxiliam ao cálculo da densidade ótima de estradas.

Uma técnica fundamental, que auxilia o planejamento de estradas florestais, é a Densidade Ótima de Estradas (DOE). Pereira Neto (1995) cita que a DOE, é um método quantitativo, que expressa a quantidade de estradas para uma dada área florestal, otimizando, em termos técnicos e econômicos, a relação entre estradas e colheita florestal. Sendo essa, determinada com base no custo de construção e manutenção de estradas, custo de extração florestal e custo de perda de área produtiva.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

Determinar a densidade ótima de estradas florestais em diferentes cenários de volume médio individual (VMI) e Combinação Veicular de Carga (CVC) propostos, em plantios de *Eucalyptus spp.*

2.2. Objetivos Específicos

- Classificar as estradas, sendo elas: estradas primárias, secundárias e terciárias;
- Determinar os pontos críticos para diferentes CVC de transporte de madeira, com base na declividade das estradas do local;
- Determinar a densidade ótima de estradas em função da análise de custos do tipo de CVC e VMI da floresta;
- Analisar a capacidade de estocagem de madeira nas estradas florestais; e
- Recomendar com base na densidade ótima de estradas (DOE) o tamanho mínimo e máximo dos talhões.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Setor Florestal Brasileiro

O setor florestal pode ser definido como parte da sociedade relacionada ao uso do conjunto de atividades, que exploram, conservam, manejam, renovam, transformam e/ou implantam recursos florestais (BREPOHL, 1980 apud PASA et al., 2020). Esse setor se relaciona, especialmente, com o uso dos recursos da flora, em particular, das florestas naturais ou plantadas (CARVALHO et al. 2005). Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2020), quase 50% das florestas tropicais úmidas naturais existentes estão no continente americano, deste total, mais da metade pertencente ao território brasileiro.

O território nacional possui 851,48 milhões de hectares, sendo 497,96 milhões de hectares cobertos por florestas, e dessa área, aproximadamente 98% é de floresta nativa e 2% é de floresta plantada (SFB, 2020). Dentre os 2% citados anteriormente, estão as áreas de unidades de conservação da categoria de uso sustentável e florestas nacionais, estaduais e municipais, e sob a iniciativa privada, as áreas de preservação permanente, reserva legais das propriedades rurais e as de produção das indústrias.

A partir dos anos de 1966, com os incentivos fiscais em projetos florestais (Lei nº 5.106, de setembro 1966) que duraram até 1988, houve um crescimento acelerado de plantios florestais (BACHA, 1991). Mesmo após o fim dos incentivos fiscais, a área de floresta plantada saltou aproximadamente 575% em 50 anos. Isso se dá, principalmente em decorrência das oportunidades geradas do setor florestal brasileiro e pela necessidade de substituição de madeira de origem nativa por madeira de plantio florestal comercial, para usos energéticos e industriais (MOREIRA et al. 2017).

A cadeia produtiva da atividade florestal apresenta diversidade de produtos, compreendendo um conjunto de atividades e segmentos que incluem desde a produção até a transformação da madeira bruta em celulose, papel, painéis de madeira, madeira serrada, carvão vegetal e móveis, além dos produtos não madeireiros (MOREIRA; OLIVEIRA, 2017). Ainda que cada uma das atividades e segmentos dos produtos florestais possua mercado próprio, as condições para o seu desenvolvimento estão associadas à base florestal, tornando-os interdependentes e possuidores de uma dinâmica específica, determinada pela oferta de madeira e pela

produtividade das florestas. Na Figura 1 é possível visualizar a cadeia produtiva do segmento florestal.

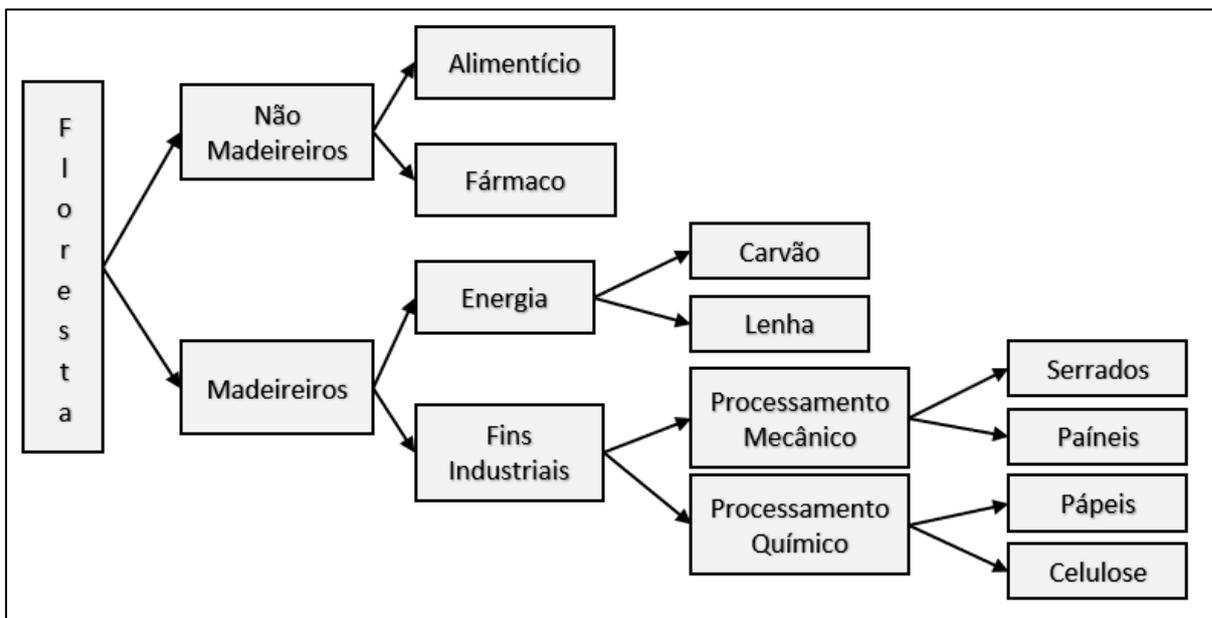


Figura 1 - Fluxograma geral da cadeia produtiva florestal.

Fonte: O autor (2022), adaptado de Carvalho et al. (2005).

O último relatório publicado pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2021), que é a principal associação responsável pela representação institucional da cadeia produtiva de árvores plantadas, mostra que no ano de 2020, a receita bruta estimada do setor florestal foi R\$ 116,6 bilhões. Esse valor corresponde a 2,7% do PIB nacional, representando o aumento de 17,6% em relação ao ano anterior. Para gerar essa receita o setor dispõe de 9,55 milhões de hectares destinados para produção de floresta e outros 6 milhões reservados para áreas de conservação ambiental.

Em aspectos sociais, o seguimento florestal, gera mais de 1,5 milhão de postos de trabalhos diretos e indiretos, além do atendimento a 6,8 milhões de pessoas em programas socioambientais (IBÁ, 2021). Em relação as questões ambientais, estimam-se que as florestas de produção tenham estocado aproximadamente 1,9 bilhão de toneladas de dióxido de carbono (CO²), além de quase 2,6 bilhões de toneladas de CO² nas áreas de conservação (IBÁ, 2021).

Os estados brasileiros que apresentam maiores áreas dedicadas ao cultivo de florestas com fins industriais são, respectivamente, Minas Gerais (22,30%), São Paulo, (16,23%) e Mato Grosso do Sul (11,94%), que juntos representam mais da metade da área plantada no país

O estado do Mato Grosso do Sul (MS) vem se destacando nos últimos anos com o rápido crescimento na produção de celulose, de acordo com os dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2021). Comparando os biênios 2007/2008 a 2017/2018, o estado avançou da décima quarta para terceira colocação em produção de celulose, com 11,09% da produção nacional em 2018, onde a produção brasileira atingiu 21,1 milhões de toneladas. De acordo com o último relatório publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), dos dez municípios de maior área florestal plantada no Brasil, cinco são da região centro-leste do MS, sendo eles: Três Lagoas, Ribas do Rio Pardo, Água Clara, Brasilândia e Selvíria

3.2. Geotecnologias Aplicadas ao Setor Florestal

Com a evolução tecnológica, as novas tecnologias vêm sendo progressivamente absorvidas pelas empresas florestais, entre elas, destaca-se os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). As geotecnologias podem ser definidas como um conjunto de técnicas e ferramentas para coleta, processamento, análise e disponibilização de informações geoespaciais (EPSTEIN et al., 2006). O uso dessas tecnologias possibilita a obtenção de dados que suportam a gestão ambiental e operacional no sistema de produção florestal (SANTOS, 2021).

No setor florestal normalmente se usava SIG para construção e armazenamento de mapas e em trabalhos topográficos, como dimensionamento de áreas e distâncias. Com o tempo, seu uso foi estendido para análise de uso e ocupação do solo e demais contexto espacial (BASKENT; KELES, 2005). O SIG destaca-se em diversas áreas do setor florestal como por exemplo: em operações florestais, manejo florestal, manejo de bacias hidrográficas, proteção de florestas, transporte de madeira, incêndios florestais e estradas florestais, pois apresenta ferramentas que podem auxiliar na correta identificação dos desvios e tomada de decisão (AKAY, 2012).

Epstein et al. (2006) e Legües et al. (2007) investigaram o problema de alocação das máquinas florestais com base na localização das estradas de acesso, considerando as restrições topográficas, custos de colheita e custos de construção de estradas. Através do uso do SIG, os autores conseguiram agilizar os processos e propor diferentes cenários de alocação de máquinas nos talhões das fazendas, uma

vez que este problema era solucionado pelos engenheiros florestais, que planejavam a localização das máquinas florestais manualmente, baseando-se apenas em mapas.

Moraes (2014) utilizou das ferramentas de geotecnologia em uma empresa florestal na região leste de Minas Gerais. Através dessa técnica, foi possível caracterizar e classificar a rede viária florestal, estimar a velocidade do veículo de transporte de madeira e estabelecer as melhores rotas para o transporte rodoviário florestal.

No setor de logística das empresas florestais, o SIG normalmente é aplicado no planejamento da malha viária. Com o uso desses recursos é possível gerar informações necessárias, como modelo digital de elevação e declividade do terreno. Essas técnicas de SIG também são aplicadas no transporte florestal, pois informa onde estão disponíveis as áreas com estoque de madeira, topografia, tipo de solo e a rede de estradas existente (ARAÚJO, 2019; RIBEIRO et al., 2017).

Segundo Santos (2021) o SIG também é aplicado na determinação de viabilidade de empreendimentos florestais, pois através desta ferramenta são possíveis estimar os custos de construção das estradas, analisar o tipo de solo, a drenagem e o declive das áreas. A ampla área de geoprocessamento se torna eficiente para o setor florestal, ajudando a desenvolver fatores chaves que auxiliam a tomada de decisão pelos gestores.

3.3. Colheita Florestal

A colheita florestal pode ser definida como um conjunto de técnicas aplicadas a floresta, com objetivo de cortar e extrair a madeira da área do talhão até acomodá-la em pilhas na margem das estradas. Em seguida, essa madeira será transportada ao centro consumidor. Pode-se dizer, que as etapas que compreendem essa operação florestal são: corte (derrubada, desgalhamento, traçamento, destopamento, e em alguns casos o descascamento), e a extração da madeira (TANAKA, 1987; MACHADO, 2014).

De acordo com Schneider e Finger (2000) e corroborado por Souza (2011), a colheita florestal é a operação que requer maior atenção na atividade florestal, pois ela tem como características principais o alto custo e os riscos de segurança causados no momento do corte das árvores. A colheita florestal representa cerca de 60 a 70% do custo final da madeira entregue na fábrica (MALINOVSKI; MALINOVSKI, 1998).

Outros autores corroboram com esse fato, como Valença et al. (2000), que verificou a representatividade da colheita como mais de 50% dos custos e Souza (2001), que afirma essa atividade refletir aproximadamente 70% dos custos da madeira colocada no pátio. Já Moreira et al. (2004), afirmou que a colheita florestal pode chegar a mais de 50% do custo total da madeira posta no consumidor final.

A colheita tem sido o processo do setor florestal em que mais se intensificou a mecanização das operações das empresas nas últimas décadas. Os motivos da priorização da mecanização deste processo, deve-se por diversos fatores, os quais pode-se destacar a maior demanda de madeira, o aumento dos custos associados a mão de obra e falta dela, a maior produtividade, o risco de acidentes no trabalho e a busca pela excelência operacional (MACHADO, 2014).

O sistema utilizado na colheita florestal pode ser definido como um conjunto de atividades integradas entre si, que permitem o escoamento constante de madeira, evitando os pontos de estrangulamento, e levando os equipamentos à sua máxima performance (MACHADO, 2014). Segundo Oliveira (2013) e Malinovski et al. (2014), os diversos sistemas de colheita podem variar com as condições topográficas, regime de manejo, volume médio da floresta, uso final da madeira, disponibilidade de máquinas, equipamentos e demais recursos.

Segundo a FAO (1974), existem diferentes formas de classificação dos sistemas de colheita florestal, podendo ser quanto ao local onde é realizado o processamento final, ao grau de mecanização e à forma da madeira na fase de extração.

Atualmente no Brasil, destaca-se a classificação do sistema de colheita quanto à forma da madeira no momento da extração (MACHADO et al., 2014; MALINOVSKI et al., 2014), tendo maior relevância dois sistemas de colheita:

- Sistema de árvores inteiras (*Full Tree - FT*): As árvores são derrubadas e extraídas para as margens dos talhões, estradas ou pátios intermediários, onde é realizado o processamento completo madeira, desgalhamento, destopamento, traçamento e empilhamento, (MACHADO, 2014). Este sistema, normalmente, é composto pelas máquinas: *feller* ou *feller buncher*, *skidder*, e garra trançadeira ou *harvester*, a primeira realiza a derrubada, a segunda a extração com arraste e a última o processamento da madeira (OLIVEIRA, 2013)

- Sistema de toras curtas (*Cut To Length - CTL*): Este sistema de colheita florestal, as árvores são processadas no local de derrubada, e posteriormente, transportadas para as margens das estradas ou pátios intermediários na forma de toras (MACHADO, 2014). Esse sistema, normalmente, é composto por duas máquinas: *harvester* e *forwarder*, o *harvester* realiza o corte e processamento das árvores e o *forwarder* realiza a extração da madeira na forma de baldeio para margem do talhão, estrada ou pátio intermediário (OLIVEIRA, 2013; MALINOVSKI et al., 2014).

3.4. Extração Florestal

De acordo com Machado et al. (2014) a extração da madeira refere-se à movimentação da madeira desde o local de corte, do interior até a margem do talhão, estrada, carreador ou pátio intermediário. Há diversos sinônimos para essa operação, podendo estar atrelado ao método em que será realizada ou o tipo de máquina usada. Os mais citados são baldeio, arraste, encoste e transporte primário (SEIXAS; CASTRO, 2014).

No Brasil a extração florestal, é, na grande maioria das vezes, realizada pelo *forwarder* ou pelo *skidder*. O *forwarder* é um tipo de trator autocarregável articulado que se aplica no baldeio, onde a madeira é retirada do interior do talhão apoiada sobre sua plataforma ou caixa de carga. Já nas atividades com uso do *skidder*, a madeira fica em contato total ou parcial com o terreno. Esse último processo de extração, normalmente denominado de arraste, pode utilizar também guinchos (SEIXAS; CASTRO, 2014).

Há diversas variáveis que influenciam diretamente a extração da madeira, dentre os principais fatores podemos destacar a densidade de estradas (DE), a densidade do talhão, capacidade de sustentação do solo, volume médio individual da árvore (VMI), distância de extração e a declividade do terreno (ZAGONEL, 2005; OLIVEIRA, 2013; SEIXAS E CASTRO, 2014; LOPES e DINIZ, 2015; SOUZA, 2016; BONAZZA, 2019). Ainda existem outros fatores que afetam a extração florestal, como por exemplo a experiência do operador, condições climáticas, estado de conservação dos equipamentos, tipo e capacidade das máquinas (BURLA, 2008; SEIXAS E CASTRO, 2014; MACHADO, 2014).

Na Tabela 1, é possível verificar a influência dos principais fatores citados anteriormente, e sua correlação com a extração florestal.

Tabela 1 - Principais fatores que influenciam a extração florestal e seu tipo de correlação.

Variáveis	Influência na Extração Florestal	Correlação
Densidade de Estradas	<ul style="list-style-type: none"> • Quanto maior a densidade de estradas, maior é a alternativa de estradas que o equipamento de extração tem para depositar a madeira; • Isso significa maior tempo gasto em atividades efetivas da produção, menor deslocamento, conseqüentemente maior produtividade; 	Positiva
Densidade do Talhão	<ul style="list-style-type: none"> • Talhão com alta densidade, faz com que o equipamento se desloque menos para coletar a madeira no interior do talhão; • Isso significa menos ciclos operacionais, ou seja, maior produção ao longo do dia; 	Positiva
Sustentação do Solo	<ul style="list-style-type: none"> • Estão condicionados ao tipo de solo; • Relacionada a sustentação e tração das máquinas; • Dependendo do teor de umidade do solo, ocorre uma condição de derrapagem das máquinas; • Pode-se chegar até a total paralização dos movimentação do veículo em determinado tipo de solo e conteúdo de umidade; • Quanto maior a capacidade de sustentação do solo, maior é a produtividade na extração; 	Positiva
Volume Médio Individual da Árvore (VMI)	<ul style="list-style-type: none"> • Quanto menor o VMI, menor é a produtividade; • VMI maiores significam menos tempo para completar uma carga ou ciclo; • Maiores VMI, podem reduzir o custo operacional variável (R\$.m⁻³); 	Positiva
Distância de Extração	<ul style="list-style-type: none"> • Quanto menor é a distância de extração, maiores são as possibilidades de a máquina realizar mais ciclos operacionais ao longo do dia; • Maiores distâncias, fazem com que a máquina gaste mais tempo em deslocamentos, reduzindo o tempo efetivo de produção; 	Negativa
Declividade do Terreno	<ul style="list-style-type: none"> • Maiores declividades fazem com que a máquina gaste mais esforço e tempo no processo de extração florestal; • Em maiores declividades, as máquinas tendem a se deslocarem mais, comparado a mesma condição em menores declives; • Conjugado com outros fatores, como condições climáticas e tipo de solo, pode agravar as condições, ocorrendo a derrapagem e paralização da operação; • Outro ponto da declividade, é que essa é uma característica que pode facilitar a mecanização, quanto menor a declividade, maior é a possibilidade de mecanizar o processo. 	Negativa

Fonte: O autor, adaptado de Zagonel (2005), Oliveira (2013), Seixas e Castro (2014), Lopes e Diniz (2015), Souza (2016) e Bonazza (2019).

3.5. Estradas Florestais

As estradas florestais podem ser definidas como as vias de acesso que viabilizam a implantação, a manutenção, a colheita e o transporte da madeira até o consumidor final (MACHADO, 1989). As estradas devem ser dimensionadas em relação ao sistema de colheita que serão utilizados, a fim de otimizar a operação florestal. Isso porque, a densidade e a localização das estradas, poderão delimitar o tipo de máquina e a produtividade da extração da madeira, acarretando impactos no custo do produto (PEREIRA NETO, 1995).

Ressalta-se que a atividade florestal é altamente dependente de uma rede de estradas consolidadas e eficientes, dado que a maioria dos produtos florestais são transportados sobre caminhões (HENNINGSSON et al. 2007).

3.5.1. Classificação das Estradas

As estradas florestais podem ser classificadas de diversas formas, quanto à sua posição geográfica, quanto à sua função, quanto à sua jurisdição e quanto às suas condições técnicas (MACHADO, 1989). Define-se uma estrada de baixo volume de tráfego como uma estrada que apresenta um tráfego diário médio (Volume Médio Diário Anual de Tráfego) de menos de 400 veículos por dia e, em geral, as velocidades de desenho são de menos de 80 km por hora (KELLER; SHERAR, 2010).

As empresas florestais, em sua minoria possuem um sistema de classificação de estradas florestais com seus respectivos padrões. Normalmente, são consideradas as características locais e o regime de manejo, porém são poucos difundidas.

As principais formas de classificação das estradas florestais, foram propostas por Machado (1989), em sua tese de doutorado, onde se gerou o Sistema Brasileira de Classificação de Estradas Florestais (SIBRACEF), sendo elas:

- Primária: interligam as florestas às estradas municipais ou rodovias, devendo possuir boa drenagem, boa superfície de rodagem, largura de mais de 7 metros e permitir o tráfego de veículos durante todo o ano. Também é caracterizada, por possuir mão dupla de tráfego de veículos, possuir revestimento primário ou revestimento com brita/cascalho em trechos de maior trafegabilidade;

- Secundária: são responsáveis pela interligação das estradas primária as áreas de produção ou talhão, normalmente possuem mais de 4 metros de largura, permite tráfego único de veículos, tem um padrão construtivo mais simples que as

primárias. Além de serem revestidas em pontos críticos as operações ou que demandam maior fluxo de veículos;

- Terciária: são estradas que dividem as áreas de produção ou talhão, possui pista simples, normalmente não tem revestimento, largura em torno de 4 metros e é construída para favorecer a extração florestal.

Existem também outras formas de classificar as estradas, conforme Lopes; Machado; Souza (2002) e Malinovski; Carvalho; Carvalho (2004) apud Corrêa (2005):

- Divisoras: são áreas limpas de vegetação que foram deixadas entre os talhões com o intuito de dividir as unidades de manejo. Podem ser utilizadas dependendo do planejamento da colheita e transporte como rota operacional, chegando a nível de secundária ou terciária;

- Contornos: são áreas limpas de vegetação que fazem divisa com as áreas de preservação permanente ou reserva legal. Podem ser utilizadas dependendo do planejamento da colheita e transporte como rota operacional, chegando a nível de secundária ou terciária;

- Aceiros: são áreas limpas de vegetação que tem a função de impedir a propagação do fogo de propriedades vizinhas. Podem ser utilizadas dependendo do planejamento da colheita e transporte como rota operacional, chegando a nível de secundária ou terciária;

- Trilhas, ramais ou caminhos de máquinas: estas estradas representam situações em que só ocorre o trânsito de máquinas florestais, são abertas pelas próprias máquinas de extração ou em alguns casos são planejadas, conforme demanda.

Com isso, o primeiro passo da tomada de decisão na malha viária florestal, é entender com clareza o tipo e a classificação das estradas que existem ou que serão implantadas em suas áreas. Essas informações servem como subsídio de direcionamento de investimentos, gestão e melhor adequação das operações florestais.

3.5.2. Construção e Manutenção das Estradas

A construção das estradas florestais por meio do revestimento com cascalho ou brita é, normalmente, o maior custo do investimento de estradas, podendo representar entre 30% e 60% do custo total (SANTOS, 2021). Os custos das estradas florestais devem ser dimensionados no início do planejamento do empreendimento

florestal, uma vez que a construção das estradas florestais objetiva alcançar o custo mínimo de extração e transporte de madeira, combinando adequadamente a construção e manutenção da rede viária florestal (Machado, 2013).

Após a sua construção, todas as estradas florestais sofrem danos derivados do uso e exposição aos fatores abióticos. Dada a necessidade de uma rede viária eficiente, segundo Corrêa (2005), a manutenção das estradas florestais está diretamente relacionada com a qualidade de construção e o fluxo de veículos. Assim, recomendam-se manutenções periódicas nas estradas principais e manutenção preventiva na rede viária secundária, considerando-se a sazonalidade das atividades de intervenção na floresta (plantio, manutenção florestal, colheita e transporte da madeira), períodos em que ocorre maior intensidade de tráfego de veículos.

O tráfego de veículos desgasta a estrada, atrasa o ciclo operacional e provoca a desagregação das partículas do leito preparado, ocorrendo os processos erosivos. Esta degradação natural pode ser controlada através da manutenção periódica das estradas (DNIT, 2005; DER/DF, 2016). De acordo com Weeb et al. (2014), a drenagem é o principal mecanismo de conservação do solo. Sua função é realizar o ordenamento do escoamento superficial da água da chuva, além de atuar no controle de erosão e aumentar a vida útil da estrada.

Segundo DNIT (2005), Marcelino et al. (2012), DER/DF (2016), Loura (2011) apud Gonçalves (2018), as principais estruturas de drenagem utilizadas nas estradas rurais, são:

- Caixa de retenção: também conhecidos como mini curva, são estruturas implantadas ao logo das estradas que fazem parte do sistema de drenagem. Sua função é reter o fluxo da água pluvial por um tempo, evitando o acúmulo de água na estrada. Sua aplicação pode variar dependendo do tipo de solo, porém tende a ser construída a cada 60 metros;

- Desaguadouros: também conhecidos como murchão, camalhão ou tobagã em algumas regiões do Brasil, são estruturas construídas transversalmente ao leito da estrada, semelhante a um quebra-molas ou redutor de velocidade. Sua principal função é desviar a água da chuva que escorre pela estrada, para as caixas de retenção;

- Sarjetas: também conhecido como canaleta ou vanetas, são as faixas formadas pelo limite da estrada com o talhão, podendo ser de terra, brita ou de

concreto, formando uma calha que coleta as águas pluviais oriundas da estrada, normalmente construído em local com maior acúmulo de água e em estradas estreita ou de menor cota em relação ao talhão. Sua principal função é direcionar o fluxo de água superficial para a área de preservação permanente (APP), bueiro ou curso d'água;

- Caixa seca: que são reservatórios escavados construídos às margens das estradas, normalmente na borda de APP ou estradas “encaixotadas”, menor cota em relação ao talhão. Sua principal função é evitar o avanço do processo erosivo, retendo a água da chuva e os sedimentos sólidos.

3.5.3. Densidade Ótima de Estradas

A quantidade de estradas, definidas em metros lineares ou metros quadrados em relação à área total ou de efetivo plantio (hectares) é o principal indicador avaliado durante o planejamento das estradas florestais (ZAGONEL, 2005). A adequada análise da quantidade das estradas poderá refletir em menores custos operacionais, melhor aproveitamento das áreas florestais e redução de possíveis impactos ambientais (SOUZA, 2016). Essa análise tão importante, conhecida como densidade ótima de estradas (DOE), foi desenvolvida por Matthews (1942) e aprimorada por FAO (1974), por meio da minimização do custo total, relacionada a três fatores: Custo de estradas florestais por unidade de distância; Volume por unidade de área; Custo de extração da madeira por unidade de distância.

O quantitativo de estradas nas áreas florestais poderá influenciar na atividade de extração da madeira, pela redução ou aumento da distância média de extração, e, conseqüentemente, na produtividade e custos das operações florestais, além de impactar na perda de área de plantio e na quantidade de sedimentos que impactam os processos erosivos (GHAFARIAN et al., 2009; ZAGONEL, 2005).

Segundo a FAO (1974), a densidade ótima de estradas florestais, em metros por hectare, resulta em um menor custo combinado de extração, construção e manutenção de estradas. Pesquisas recentes indicam novos fatores que atuam na densidade de estradas. Como exemplo de novos fatores, pode-se citar o sistema de colheita a ser empregado, custo da terra, custos ambientais, declividade do terreno, capacidade de estocagem de madeira e custos imobilizados (ZAGONEL, 2005; GHAFARIAN et al., 2009, SOUZA, 2016, FARIA, 2020).

Zagonel (2005) e Souza (2016) inseriram a perda de área efetiva no método de determinação da densidade ótima de estradas, o que possibilitou encontrar a DOE por meio da minimização da soma dos custos de construção e manutenção de estradas, extração e perda de área produtiva. A densidade ótima de estradas encontrada no estudo de Zagonel (2005), foi entre 25,47 e 30,48 m.ha⁻¹ em áreas planas, com sistema “full tree”, em plantios de pinus nas regiões de Correia Pinto em Otacílio Costa (SC). Já no estudo de Souza (2016), houve uma redução na casa de 60 m.ha⁻¹ na colheita de pinus no sistema “full tree”, e encontrou-se uma DOE de 32,09 m.ha⁻¹.

Faria (2020), além da DOE, determinou também a densidade operacional, que leva em consideração a capacidade de estocagem de madeira nas estradas florestais e o número de máquinas de extração para atendimento da demanda anual, bem como a depreciação das máquinas. Por meio desse estudo, o autor verificou que a DOE pode ser subestimada por não levar em consideração os fatores citados acima. Isso pode ser observado nas análises do estudo, onde a densidade operacional foi maior que a DOE e menor do que a densidade de estradas existentes, em todos os cenários analisados. A redução da densidade existente com a operacional foi de 11,1 m.ha⁻¹ em plantio de eucalipto de relevo plano, e a existente em relação a DOE foi de 47,1 m.ha⁻¹ em plantio de eucalipto de relevo plano.

Souza (2018) e Bonazza (2019), determinaram a DOE nas mesmas condições operacionais, com povoamentos de *Pinus taeda* L. de uma empresa florestal localizada no planalto serrano de Santa Catarina, onde a densidade atual de estradas era de 92,02 m.ha⁻¹. No primeiro estudo, considerando apenas a minimização dos custos com estradas e extração, as densidades de estradas foram 22,85 e 15,63 m.ha⁻¹ para os sistemas toras longas e toras curtas, respectivamente. Já no segundo, Bonazza (2019) acrescentou o balanceamento do número de máquinas de cada sistema de colheita e definiu uma meta mínima mensal de produção. Com isso, a DOE do sistema de toras curtas (CTL) foi de 26,97 e de árvores inteiras (FT) foi de 13,80 m.ha⁻¹. O número de máquinas só foi alterado no FT, onde houve o acréscimo de um *skidder*, usado no arraste, para atendimento da demanda proposta. Isso reforça, que a densidade de estradas aumenta diretamente o custo de extração, sendo necessário buscar um valor ótimo.

Com todo o exposto, pode-se perceber que a densidade de estradas tem influência direta no desempenho financeiro das operações florestais. A DOE

interligada ao uso de parâmetros adequados a cada situação, pode auxiliar no planejamento florestal e na tomada de decisão, visando à melhoria da aplicação de recursos financeiros e dimensionamento das operações florestais (ZAGONEL, 2005; SOUZA, 2018).

3.6. Transporte Florestal

A logística no Brasil representa um dos principais gargalos do desenvolvimento do país. Ela faz parte do chamado “Custo Brasil”, que é um conjunto de dificuldades estruturais e burocráticas que encarecem as atividades econômicas. Esse fator gera gargalos logístico e insegurança jurídica, dificultando o impulsionamento dos investimentos no país. Segundo o Instituto de Logística e *Supply Chain* (ILOS, 2017), por meio do estudo “Custos Logísticos no Brasil”, verificou-se que esses custos relacionados a logística, correspondem a 12,3% do PIB brasileiro.

De acordo com o relatório anual publicado pela Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2022), a principal matriz logística do país na movimentação de carga é o modal rodoviário (64,86%). Em seguida destaca-se o modal ferroviário, representando 14,95%. Logo após, vem cabotagem com 10,47% (Tabela 2).

Tabela 2 - Matriz do transporte de cargas por modal logístico.

Modal	Bilhões (TKU)	Participação (%)
Rodoviário	1.548,00	64,86
Ferrovário	356,8	14,95
Cabotagem	249,9	10,47
Hidroviário	125,3	5,25
Dutoviário	106,1	4,45
Aéreo	0,6	0,03
Total	2.386,70	100

Fonte: CNT (2022).

O estudo foi feito aplicando a metodologia que avalia o indicador Tonelada Quilômetro Útil (TKU), que é utilizado na representação quantitativa do desempenho das modalidades de transporte. Este importante indicador de eficiência logística é encontrado pela multiplicação da tonelada útil transportada pela distância percorrida.

A matriz logística nacional comparada a outros países de importância similar, é desequilibrada, segundo o ILOS (2020). Analisando os TKUs movimentados, percebe-se que Austrália, Canadá e Estados Unidos, se destacam pela representatividade do modal ferroviário, com 55%, 34% e 27%, respectivamente. Já no modal aquaviário

(cabotagem e hidrovias) as maiores representações ficam com a China, com 48%, Japão com 44% e União Europeia com 36%. A movimentação de cargas por meio de dutos, destaca-se no Canadá, com 40% e nos Estados Unidos, com 22%.

Wanke (2010) reforça que o maior problema que afeta o transporte de cargas no Brasil, é a distorção da matriz de transportes. O mesmo autor enfatiza que a busca pelo equilíbrio da matriz logística, significa uma maior participação de modais não rodoviários.

O modal rodoviário, tratando-se de uma visão global, apresenta maiores custos logísticos e altas emissões de gases de efeito estufa, quando comparado aos demais. Ele possui maior eficiência em pequenas distâncias e alta capilaridade, pois é o modal que possui grande investimento público. Além disso, abrange a maior parte do país, com 215 mil km de rodovias públicas pavimentadas e outras 1,35 milhões de km não pavimentados (CNT, 2022; MACHADO, LOPES; BIRRO, 2009).

No setor florestal a matriz logística é ainda mais desequilibrada em relação ao transporte de cargas em geral. De acordo com Oliveira (2013), 85% da madeira transportada no Brasil é sobre veículos rodoviários, através da movimentação de madeira dos talhões das florestas ou pátios intermediários até o consumidor final.

Os principais veículos utilizados no transporte de madeira, variam de acordo com seu tamanho e sua capacidade de carga, sendo esses escolhidos com base nas características do local de retirada da madeira. Dentre essas características destacam-se a declividade, distância de transporte e volume de madeira a ser transportado. Os veículos traçados (4x4 e 6x4), são os mais utilizados no meio florestal, devido aos desafios nas operações internas das fazendas, presença de rampas acentuadas e condições das vias. Já em regiões planas, podem ser encontrados veículos não traçados.

Machado, Lopes e Birro (2009), classificam os diferentes tipos de veículos de acordo com a combinação veicular de carga (CVC), sendo eles:

- Simples (caminhão): constituído de uma unidade tratora e transportadora – até 14 m;
- Articulado (carreta): constituído de uma unidade tratora e um semirreboque – até 18,6 m;
- Conjugado (biminhão ou Romeu e Julieta): constituído de um caminhão simples e um reboque – até 19,8 m;

- Bitrem: combinação de um cavalo-mecânico e dois semirreboques – até 19,8 m;
- Tritrem: combinação de um cavalo-mecânico e três semirreboques – até 30 m;
- Rodotrem: constituído de um cavalo-mecânico, um reboque e um semirreboque – até 30 m;
- Treminhão: constituído de caminhão simples e dois semirreboques – até 30 m.

Existem também outros tipos de combinações de veículos de carga (CVC), utilizados no setor florestal, que não são homologados para transitar em vias públicas. Esses são chamados de veículos “Off-Road”, usados nas áreas particulares das empresas florestais, onde existe a base florestal conectada com a fábrica. São eles:

- Pentatrem: combinação de um cavalo-mecânico e cinco semirreboques – próximo de 50 m, sem legislação específica;
- Hexatrem: combinação de um cavalo-mecânico e seis semirreboques – próximo de 60 m, sem legislação específica;

De forma geral, os principais fatores que afetam o transporte florestal estão atrelados a distância de percurso, características topográficas da região e a necessidade de autorizações especiais de trânsito (AET).

Alves et al. (2013) estudando em três regiões do Vale do Rio Doce, localizadas no leste do estado de Minas Gerais, em diferentes distâncias de transporte de madeira de 135, 74 e 73 km, verificaram que o tempo com o veículo em deslocamento (carregado mais vazio), foi de 75%, 77% e 70% respectivamente, em média do ciclo logístico.

O efeito declividade foi evidenciado no estudo de Malinovski (2010), em uma empresa de base florestal com atividades na produção de celulose e papel, localizada em Telêmaco Borba, no estado do Paraná. Segundo este autor, a declividade máxima calculada, possível de ser vencida por um Tritrem e um Rodotrem (9 eixos) carregado, em uma estrada de leito natural foi de 8,0%. Já para o Bitrem e Romeu e Julieta (7 eixos) este limite é de 11,4%.

De acordo com a resolução nº 211 de 13 de novembro de 2006, do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), as CVC, com mais de duas unidades, incluindo a unidade tratora, com peso bruto total acima de 57 toneladas (t) ou com comprimento total acima de 19,80 metros, só poderão circular portando AET (BRASIL, 2006). Sendo esta concedida somente pelo Órgão Executivo Rodoviário da União, dos Estados, dos

Municípios ou do Distrito Federal, mediante atendimento aos seguintes requisitos para a CVC:

- Peso Bruto Total Combinado (PBTC) igual ou inferior a 74 toneladas;
- Comprimento superior a 19,80 m e máximo de 30 metros, quando o PBTC for inferior ou igual a 57t;
- Comprimento mínimo de 25 m e máximo de 30 metros, quando o PBTC for superior a 57t;
- Limites legais de Peso por Eixo fixados pelo CONTRAN;
- A compatibilidade da Capacidade Máxima de Tração - CMT da unidade tratora, determinada pelo fabricante, com o Peso Bruto Total Combinado - PBTC;
- Estar equipadas com sistemas de freios conjugados entre si e com a unidade tratora, atendendo o disposto na Resolução nº. 777/93 - CONTRAN;
- O acoplamento dos veículos rebocados deverá ser do tipo automático conforme NBR 11410/11411 e estarem reforçados com correntes ou cabos de aço de segurança;
- O acoplamento dos veículos articulados deverá ser do tipo pino-rei e quinta roda e obedecer ao disposto na NBR NM/ ISO 337;
- Possuir sinalização especial para Combinações de Veículos de Carga – CVC e estar provida de lanternas laterais colocadas a intervalos regulares de no máximo 3 (três) metros entre si, que permitam a sinalização do comprimento total do conjunto.

A homologação dos veículos e as combinações de veículos de transporte de carga e com seus respectivos limites de comprimento, peso bruto total – PBT e peso bruto total combinado – PBTC, estão dispostos na portaria nº 86, de 20 de dezembro de 2006.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo, denominada Fazenda de Estudo, possui 9.808,7 ha e está localizada no Bioma Cerrado, mais precisamente no município de Ribas do Rio Pardo, região centro-leste do Mato Grosso do Sul, entre as coordenadas geográficas 20°26' 36" latitude Sul e 53°45'36" longitude Oeste (Figura 2). Cerca de 6.050,3 ha da área de estudo, é coberta por plantio de *Eucalyptus* spp. e o restante é coberto por áreas de proteção (reserva legal e área de preservação permanente).

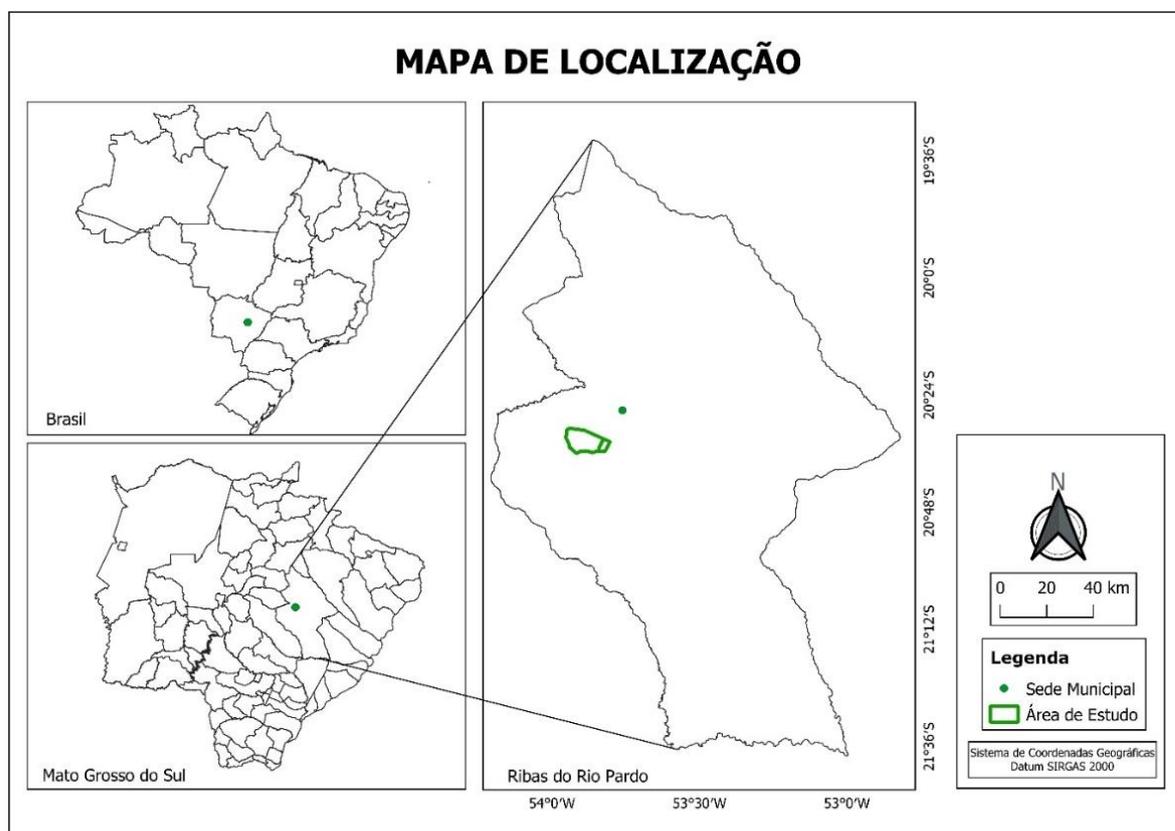


Figura 2 - Mapa de localização da fazenda de estudo, em Ribas do Rio Pardo, MS.

Fonte: O autor (2022).

O clima predominante na região é do tipo "Aw" (clima tropical com estação seca, com chuvas de verão e inverno seco), de acordo com a classificação de Köppen (ÁLVARES et al., 2013). Apresenta uma temperatura média anual variando entre 19 e 23°C e precipitação em torno de 1.300 mm ao ano (SOUZA et al., 2017).

A altitude média da região é de 380 metros ao nível do mar (CARVALHO et al., 2015). O solo de ocorrência predominante no local é o de categoria Neossolo

Quartzarênico. São solos de fertilidade natural baixa, com característica textural arenosa e com grande potencial erosivo (EMBRAPA SOLOS, 2006).

4.2. Caracterização das Combinações Veiculares de Carga (CVC) no Transporte Florestal

Os principais veículos que atuam no transporte de madeira são o Bitrem e o Tritrem. A declividade que apresenta risco operacional se baseou em procedimentos internos disponibilizados pela empresa florestal. Os parâmetros do bitrem e tritrem corroboram com o estudo feito por Malinovski (2010), demonstrado na Tabela 3.

Quanto ao Hexatrem, que é um tipo de veículo mais longo, este CVC apresenta mais restrição para operacionalizar, só podendo trabalhar em condições de estradas internas da empresa. Os parâmetros de declividade utilizados nestes estudos, para o Hexatrem, foram obtidos pelos procedimentos internos da empresa (Tabela 3).

Tabela 3 - Classificação da condição ideal e de risco operacional das CVC no transporte florestal.

CVC	Declividade (%)	
	Condição Ideal	Risco Operacional
Bitrem	$0 \leq 12$	> 12
Tritrem	$0 \leq 8$	> 8
Hexatrem	$0 \leq 5$	> 5

Fonte: Adaptado de Malinovski (2010) e da empresa florestal.

4.2.1. CVC do Tipo Bitrem

De acordo com a portaria 86 de 2006, do CONTRAN, o bitrem pode ser descrito como um conjunto formado por 3 veículos, sendo um veículo trator com 3 eixos, um semirreboque de 2 eixos com uma quinta roda na traseira de seu chassi e mais um segundo semirreboque de 2 eixos (BRASIL, 2006). Este conjunto tem Peso Bruto Total Combinado – PBTC de 57 t, uma capacidade de carga líquida de aproximadamente 37 t e 7 eixos no total. Comprimento máximo de 19,80 m e dispensa a necessidade de AET (Figura 3).

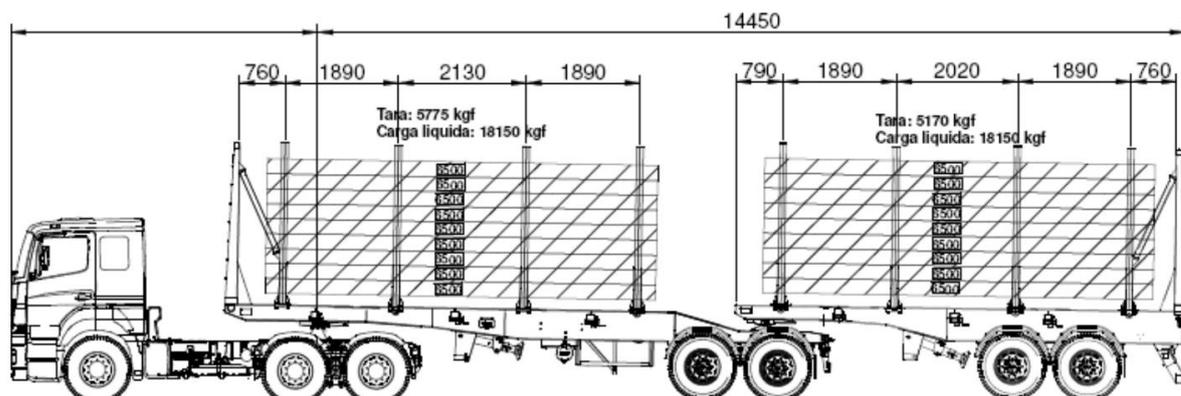


Figura 3 - Desenho técnico de um bitrem florestal.
Fonte: Malinovski (2010).

4.2.2. CVC do Tipo Tritrem

De acordo com a portaria 86 de 2006, do CONTRAN, o tritrem pode ser descrito como um conjunto formado por 4 veículos, sendo um veículo trator com 3 eixos, dois semirreboques de 2 eixos com uma quinta roda na traseira de cada chassi e mais um terceiro semirreboque de 2 eixos (BRASIL, 2006). Este conjunto tem Peso Bruto Total Combinado – PBTC de 74 t, uma capacidade de carga líquida de aproximadamente 48,8 t e 9 eixos no total. Comprimento máximo de 30,00 m e necessidade de AET (Figura 4).

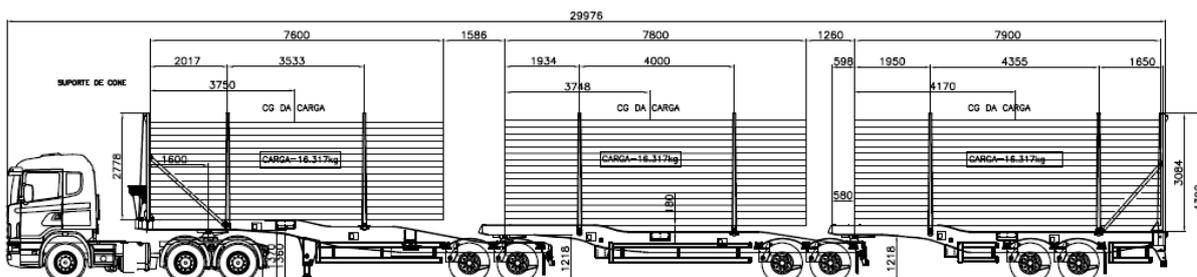


Figura 4 – Desenho técnico de um tritrem florestal.

4.2.3. CVC do Tipo Hexatrem

O hexatrem pode ser descrito como um conjunto formado por 7 veículos, sendo um veículo trator com 3 eixos, 5 semirreboques de 2 eixos, com uma quinta roda na traseira de cada chassi e mais um sexto semirreboque de 2 eixos. Este conjunto tem Peso Bruto Total Combinado (PBTC) de 250 t, uma capacidade de carga líquida de

aproximadamente 197,3 t e 15 eixos no total. Comprimento próximo de 60 m e só pode deslocar em áreas internas de propriedade da empresa florestal (Figura 5).

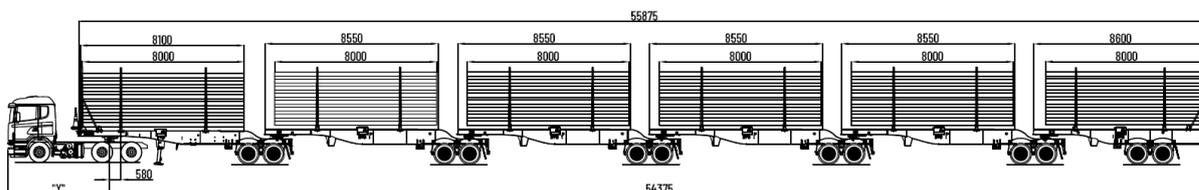


Figura 5 - Desenho técnico de um hexatrem florestal.

4.3. Obtenção dos Dados e Análises

4.3.1. Tipos de Solo

A caracterização do solo predominante na área de estudo foi realizada a partir dos arquivos vetoriais referentes aos tipos de solos, disponibilizados no portal da Embrapa Solos, no acervo cartográfico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA SOLOS, 2006). Através desse banco de dados, foi possível verificar a distribuição geográfica dos tipos de solos e classificá-los até o terceiro nível de classificação categórico de solos, obtendo-se assim, o percentual de cada tipo de solo presente na região, o que possibilitou uma visão ampla do comportamento da pedologia local.

4.3.2. Uso e ocupação do Solo

Para análise de uso e ocupação do solo, utilizou-se informações e arquivos vetoriais disponibilizados pela empresa proprietária da fazenda. O *software* de SIG utilizado nas análises de geoprocessamento foi o QGIS, versão 3.20. O *Software Microsoft Excel 365* foi utilizado para cálculos de áreas e produção de tabelas.

4.3.3. Declividade

Inicialmente gerou-se o modelo digital de elevação (MDE), por meio de imagens do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30 metros, disponibilizado no portal do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2014). Essas imagens foram avaliadas quanto a sua qualidade e precisão, cuidadosamente antes da realização das análises.

De posse do MDE, gerou-se a análise de declividade em percentual do local, por meio de recursos de geoprocessamento presentes no *software* QGIS. Para a análise referida, considerou-se a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa, onde os intervalos de declividade considerados, estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Classes de declividade e tipos de relevo.

Declividade (%)	Tipo de Relevo
0 → 3	Plano
3 → 8	Suave ondulado
8 → 20	Ondulado
20 → 45	Forte ondulado
45 → 75	Montanhoso
> 75	Fortemente montanhoso

Fonte: Santos et al. (2018).

Posteriormente transformou-se o arquivo matricial gerado na análise de declividade, em um arquivo do tipo vetor, para calcular a área que corresponde a cada classe gerada. Isso foi possível utilizando um recurso do *software* QGIS, versão 3.20, denominada ferramenta de conversão.

4.4. Análise de Estradas

4.4.1. Classificação das Estradas

Para gerar a classificação das estradas, utilizou-se informações fornecidas pela empresa, como microplanejamento e arquivo vetorial (estradas, perímetro, uso e ocupação do solo). Além disso, a denominação para cada classe de estradas, foi baseada na metodologia proposta por Machado (1989), são elas:

- Estradas Primárias: possuem 10 metros de largura ou mais, revestidas com material externo e dispõem de sentido duplo de deslocamento. Utilizadas para dar acesso a fazenda durante toda época do ano.
- Estradas Secundárias: apresentam 5 metros de largura ou mais, ocasionalmente revestidas com material externo em pontos estratégicos, para evitar gargalos no transporte de madeira. Elas também apresentam sentido

único de trafegabilidade e têm como principal função garantir o acesso aos talhões nos períodos de plantio, colheita e transporte.

- Estradas Terciárias ou Contornos: São estradas que apresentam até 5 metros de largura, não revestidas com material externo e utilizadas como rota de transporte de madeira com sentido único. Estão localizadas estrategicamente nas bordas das APPs e Reserva Legal, a fim de servirem como aceiros e evitarem uma possível expansão do fogo.

As estradas da área de estudo foram classificadas conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação das estradas florestais na fazenda de estudo, Ribas do Rio Pardo, MS.

Classificação	Largura	Revestimento	Uso	Tráfego	Função
Estrada Primária	10 m	Sim	Todo ano	Duplo	Acesso a Fazenda
Estrada Secundária	5 m	Parcial	Em operações	Único	Acesso aos Talhões
Estrada Terciária ou Contorno	5 m	Não	Sazonal	Único	Aceiros e rota de transporte

Fonte: O autor (2022), adaptado de Machado (1989).

4.4.2. Determinação da Declividade das Estradas

Para associar uma informação relativa à declividade de cada trecho de estrada, foi necessário a utilização de algumas técnicas e ferramentas do *software* QGIS e da sua extensão GRASS. De posse do arquivo vetorial da rede de estradas, criou-se uma camada de pontos a partir dos seus vértices, utilizando a ferramenta *extractvertices*.

Logo após, por meio da função *sample raster values*, foi possível associar cada um dos pontos gerados anteriormente à sua respectiva declividade. O recurso *join attributes by location (summary)* foi utilizado posteriormente para unir os valores de declividade extraídos de cada ponto, com os trechos de estradas. Por fim, o mapa da rede de estradas associada às declividades presentes nos trechos das vias, foi elaborado no mesmo software.

4.5. Sistema de Colheita Florestal e Transporte de Madeira

O sistema de colheita florestal analisado no estudo da densidade de estradas nas diferentes condições de VMI e CVC foi o de toras curtas (*cut to length – CTL*). O sistema CTL é composto pelo *harvester* que realiza o corte e o processamento e o *forwarder* que realiza a extração das toras.

O *forwarder* adotado pela empresa na extração florestal foi o de marca Komatsu, modelo 895, capacidade de carga de 20 toneladas (Figura 6).



Figura 6 – Máquina de extração adotada na empresa florestal (Forwarder).

Fonte: O autor (2022).

No presente estudo, simulou-se o comportamento da densidade ótima de estradas com base em três diferentes cenários de VMI da floresta: 0,15, 0,20 e 0,25 $\text{m}^3.\text{árvore}^{-1}$ (Tabela 6).

Tabela 6 - Cenários de estudo relacionando o tipo de veículo ao VMI da floresta.

VMI (m³.árvore⁻¹)	Tipo de CVC do Transporte Florestal		
0,15	Bitrem	Tritrem	Hexatrem
0,20	Bitrem	Tritrem	Hexatrem
0,25	Bitrem	Tritrem	Hexatrem

Fonte: O autor (2022).

Cada cenário de VMI foi associado a três tipos de CVC utilizados para transportar madeira. São cenários realistas, que representam a produtividade média das florestas e a estratégia do transporte de madeira na região de estudo. Assim foram gerados nove diferentes cenários, embasados em dados fornecidos pela empresa florestal, demonstrados por meio de análises realizadas por meio do apoio do *software* Microsoft Excel 365, que foi utilizado para os cálculos.

4.6. Determinação dos Custos Operacionais

Os custos operacionais de construção e manutenção das estradas, da extração da madeira e da perda de área produtiva nos diferentes cenários, além da produtividade dos equipamentos utilizados nas operações, foram gerados com base em dados fornecidos pela empresa florestal, onde serão detalhados nos itens a seguir.

4.6.1. Estradas Florestais

Na empresa florestal, responsável pela área de estudo, considera-se, que durante o período de colheita e transporte de madeira, deve-se reconstruir as estradas para suportar as operações florestais. Com isso, os custos com construção de estradas foram calculados a partir do somatório dos custos de depreciação e de oportunidade.

Os custos de depreciação, em relação a construção das estradas, foram obtidos com base na metodologia aplicada por Pereira Neto (1995) e Souza (2016). Esse método baseia-se na diluição do valor investido na construção da estrada, sendo considerado um intervalo de seis anos (ciclo de colheita), período esse, que é o de reconstrução das estradas, conforme a equação (1):

$$DP = \frac{COC}{IT}$$

(1)

Em que:

DP = depreciação (R\$.m⁻¹);

COC = custo com operações de construção de estradas (R\$.m⁻¹);

IT = intervalo entre colheita (anos).

Considerou-se como custo de oportunidade, os custos referentes ao uso da terra e de capital empregado na construção das estradas. O custo de oportunidade do capital, foi calculado de acordo com a equação (2) da USDA (2001) apud Souza (2018):

$$C_{capital} = \frac{Vi}{2} * i \quad (2)$$

Em que:

C_{capital} = custo anual de oportunidade do capital (R\$.m⁻¹.ano⁻¹);

Vi = valor de investimento inicial ou construção das estradas (R\$.m⁻¹);

i = taxa de juros (8% a.a.).

Após a determinação dos custos de depreciação e de oportunidade do capital em reais por metro linear, os mesmos foram convertidos em reais por metro cúbico de madeira (R\$.m⁻³), conforme equação (3):

$$CC = \frac{(DP + C_{capital}) * DE * A}{V} \quad (3)$$

Em que:

CC = custo com construção (R\$.m⁻³);

DP = custo de depreciação (R\$.m⁻¹);

C_{capital} = custo de oportunidade de capital (R\$.m⁻¹);

DE = densidade de estradas (m.m⁻²);

A = área efetiva da fazenda, plantio e estradas (m²);

V = volume total de madeira na fazenda (m³).

Os custos relacionados às atividades de manutenção não foram depreciados, pois considerou-se o cálculo apenas para o período específico, sendo gerado de acordo com a equação (4):

$$CM = \frac{COM * DE * A}{V} \quad (4)$$

Em que:

CM = custo de manutenção de estradas (R\$.m⁻³);

COM = custo com operações de manutenção (R\$.m⁻¹);

DE = densidade de estradas (m.m⁻²);

A = área total com povoamento e estradas (m²);

V = volume total de madeira na fazenda (m³).

Com isso, tem-se como cálculo final do custo de estradas, a seguinte equação (5):

$$Cest = CC + CM \quad (5)$$

Em que:

Cest = custo total com estradas florestais (R\$.m⁻³);

CC = custo com construção (R\$.m⁻³);

CM = custo de manutenção de estradas (R\$.m⁻³).

4.6.2. Extração Florestal

Os custos operacionais do *forwarder* na extração da madeira, foram obtidos por meio dos seguintes custos fixos: depreciação, juros e seguros; e dos seguintes custos variáveis: combustível, manutenção, óleos lubrificantes, graxas, óleo hidráulico, material rodante, de mão de obra e outros.

Assim como a metodologia utilizada por Zagonel (2005) e Souza (2016), nesse trabalho os custos de extração da madeira foram calculados com base no custo operacional da máquina e da produtividade estimada na operação de extração, como descrito na equação (6):

$$C_{ext} = \frac{CO}{Pr}$$

(6)

Em que:

C_{ext} = custo de extração florestal (R\$.m⁻³);

CO = custo operacional da máquina (R\$.h⁻¹);

Pr = produtividade média efetiva da operação (m³.h⁻¹).

A produtividade do *forwarder* na extração foi obtida por meio de um modelo fornecido pela empresa, que estima a produtividade da máquina a partir das variáveis de distância média de extração (DME) e volume médio individual da floresta (VMI), modelo este específico para a base florestal do Mato Grosso do Sul. Destaca-se que o modelo foi desenvolvido pela empresa a partir de um banco de dados histórico, onde compreende todos os módulos de colheita, por meio de apontamentos via sistema de telemetria e distâncias médias de extração adquiridas via elaboração do microplanejamento operacional da colheita florestal.

Por meio da DME gerada nos diferentes cenários, foi possível obter a densidade de estradas (DE), sendo calculada pela equação do fator de eficiência de estradas florestais descrito por FAO (1974) e utilizada por Ghaffarian (2009) e Faria (2020), conforme descrito na equação (7):

$$DE = \frac{a * 1.000}{DME}$$

(7)

Em que:

DME = distância média de extração (m);

DE = densidade de estradas (m.ha⁻¹);

a = fator de eficiência de estradas.

O fator de eficiência das estradas florestais, correlaciona a densidade de estradas florestais com a distância média de extração. Normalmente variando de 4 a

9, sendo menor em áreas planas (Tabela 7). Neste estudo foi utilizado um fator igual a 4,5, devido ao fato dos talhões e das estradas da área de estudo, não serem perfeitamente lineares, ou seja, dificilmente existirá talhões e estradas com formato geométrico perfeito (FAO, 1974).

Tabela 7 - Fator de eficiência das estradas florestais e a descrição.

Fator de Eficiência das Estradas (a)	Descrição
$4 \geq 5$	Relevo plano e ondulado
$5 \geq 7$	Relevo montanhoso
$7 \geq 9$	Relevo íngremes
> 9	Relevo irregular e muito íngreme

Fonte: O autor (2022), adaptado de FAO (1974).

4.6.3. Perda de Área Produtiva

Os custos relacionados à perda de área efetiva de plantio se correlacionam ao valor da madeira que seria produzido anualmente nas áreas ocupadas pelas estradas. Para os cálculos, utilizou-se as informações obtidas do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA, 2020) sobre o preço mediano da terra destinada a silvicultura em Ribas do Rio Pardo (MS), o que corresponde a R\$ 10.416,00 por ha. Esse custo da terra foi corrigido pela variação do Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), pois a informação inicial era de novembro de 2019, logo, necessitou-se da correção para o mês de outubro de 2022, com base no IBGE (2022), sendo esse acréscimo correspondente a 22,45%.

Já o custo da madeira, foi obtido com base no boletim Floresta Plantada da FAMASUL (2022). O preço médio da madeira em pé, na região centro leste do Mato Grosso do Sul, foi de R\$ 116,68 por m³ no mês de agosto de 2022.

Posteriormente, embasado nas análises anteriores, o valor associado a área ocupada da terra com estradas, foi obtido pelo produto do preço da terra e a área ocupada pelas estradas, conforme a equação (8):

$$Cte = Ae * Pt \tag{8}$$

Em que:

Cte = custo da terra na área com estradas (R\$);

Ae = área ocupada pelas estradas (ha);

Pt = preço da terra (R\$.ha⁻¹).

O cálculo da receita total nas áreas ocupadas com estradas, foi obtido através da equação (9):

$$Rte = Ae * v * Pme \quad (9)$$

Em que:

Rte = receita total na área com estradas (R\$);

Ae = área ocupada pelas estradas (ha);

v = volume de madeira (m³.ha⁻¹);

Pme = preço da madeira em pé (R\$.m⁻³).

Por fim, através da equação (10), obteve-se o valor associado a perda de área produtiva:

$$Cpap = \frac{(Cte + Rte)}{V} \quad (10)$$

Em que:

Cpap = custo de perda de área produtiva (R\$.m⁻³);

Cte = custo da terra na área com estradas (R\$);

Rte = receita total na área com estradas (R\$);

V = volume total de madeira na fazenda (m³).

4.7. Determinação da Densidade Ótima de Estradas

A densidade atual (DE) de estradas da área de estudo, foi determinada por meio da divisão do comprimento total das estradas (metros), pela área efetiva

disponível para produção (hectares), conforme metodologia utilizada por Lotfalian (2009), descrita na equação (11):

$$DE = \frac{E}{Ah} \quad (11)$$

Em que:

DE = densidade atual de estradas ($m \cdot ha^{-1}$);

E = comprimento total das estradas (m);

Ah = área total efetiva (ha);

O comprimento das estradas e a área efetiva disponível para plantio foi definida por meio do software de SIG, QGIS, versão 3.20, utilizado nas análises de geoprocessamento.

A determinação da DOE, para cada cenário estudado, foi obtida por meio do método indireto, baseado nos trabalhos de FAO (1974), Zagonel (2005), Souza (2011) e Souza (2018).

A DOE é encontrada no ponto no qual o somatório dos custos de construção e manutenção de estradas, custos de extração e custo de perda de área produtiva são mínimos. Sendo utilizada a equação (12):

$$CT = C_{est} + C_{ext} + C_{pap} \quad (12)$$

Em que:

CT = Custo total ($R\$ \cdot m^{-3}$);

C_{est} = Custos total de estradas ($R\$ \cdot m^{-3}$);

C_{ext} = Custos de extração ($R\$ \cdot m^{-3}$);

C_{pap} = Custos de perda de área produtiva ($R\$ \cdot m^{-3}$).

A DOE, então, foi determinada como sendo o menor valor da curva de custo total, resultante da relação desta variável com a densidade de estradas.

Foi determinado também o espaçamento entre estradas (EE) para situação de DE e DOE, esse indicador pode ser calculado de acordo com a equação (13) apresentada por Rezaei et al. (2013):

$$EE = \frac{10.000}{DE \text{ ou } DOE} \quad (13)$$

Em que:

EE = Espaçamento entre estradas (m);

DE = Densidade atual de estradas ($\text{m} \cdot \text{ha}^{-1}$);

DOE = Densidade ótima de estradas ($\text{m} \cdot \text{ha}^{-1}$).

4.8. Determinação da Capacidade de Estocagem da Madeira

A capacidade de estocagem nas margens das estradas, foi adaptada do estudo de Faria (2020). Onde a relação entre o volume de madeira e a quantidade de estradas disponíveis por hectare, foi expressa pela quantidade de estoque de madeira por cada metro linear de estrada.

Para obter a capacidade de estocagem teórica, foi considerado um padrão de altura de pilha, obtida através de levantamento de campo. As pilhas apresentaram em média 3,5 m de altura e o comprimento da madeira de 6,8 m (Figura 7).



Figura 7 – Pilha de madeira observada para definição da capacidade de estocagem teórica.

Fonte: O autor (2022).

Para estimar o volume de madeira, baseou-se em procedimento disponibilizado pela empresa, que contém fatores teóricos que, por meio da altura e o comprimento de madeira empilhada, transforma volume de m³ estéreo em m³ sólido, conforme equação (14):

$$Vm = Apil * Cmad * Fc \tag{14}$$

Em que:

Vm = volume de madeira por metro linear de estrada (m³.m⁻¹);

$Apil$ = altura padrão das pilhas em campo (m);

$Cmad$ = comprimento alvo de corte da madeira (m);

Fc = fator de conversão teórico de m³ estéreo para m³ sólido de madeira.

Outro ponto analisado é se a DOE suportará o volume de madeira estocado nas estradas. Para entender essa questão, avaliou-se a capacidade de estocagem das estradas nas diferentes densidades por meio da equação (15):

$$Cestoque = Vm * DE \tag{15}$$

Em que:

$Cestoque$ = capacidade de estocagem (m³.ha⁻¹);

Vm = volume de madeira por metro linear de estrada (m³.m⁻¹);

DE = densidade de estradas (m.ha⁻¹).

4.9. Determinação do Talhonamento em função da DE

Para dimensionamento do tamanho dos talhões, considerou-se que o mesmo sofre influência da densidade de estradas, pois comumente, são utilizadas como divisores de talhões, as estradas.

O comprimento do talhão foi estimado com base em Simões et al. (1981) apud Pereira Neto (1995), em que o comprimento ideal do talhão é de 500 a 1.000 metros, não devendo ultrapassar este valor em função da proteção florestal, para evitar possíveis expansão do fogo de um talhão para outro. Outro ponto considerado como

parâmetro, é quanto sua forma, ela deve ser aproximadamente geométrica, como retângulo ou quadrado.

Para o obter a largura do talhão, considerou-se como sendo o espaçamento entre as estradas. O espaçamento foi estimado de acordo com a densidade de estradas, através da fórmula matemática da relação entre o espaçamento e a densidade, equação (13).

Desta forma, para se obter o tamanho ideal do talhão, compatível com a densidade ótima das estradas e que não apresente grandes riscos de incêndios florestais, utilizou-se um intervalo entre o comprimento mínimo e máximo calculado de acordo com as equações (16) e (17).

$$\text{Min Talhão} = \frac{EE * 500}{10.000} \quad (16)$$

$$\text{Max Talhão} = \frac{EE * 1.000}{10.000} \quad (17)$$

Em que:

Min Talhão = tamanho mínimo do talhão (ha);

Max Talhão = tamanho máximo do talhão (ha);

EE = espaçamento entre estradas (m).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.2. Tipo, Uso e Ocupação do Solo

Por meio das análises desenvolvidas, observou-se que o solo predominante em Ribas do Rio Pardo é o Neossolo Quartzarênico Órtico como mostra a Figura 8.

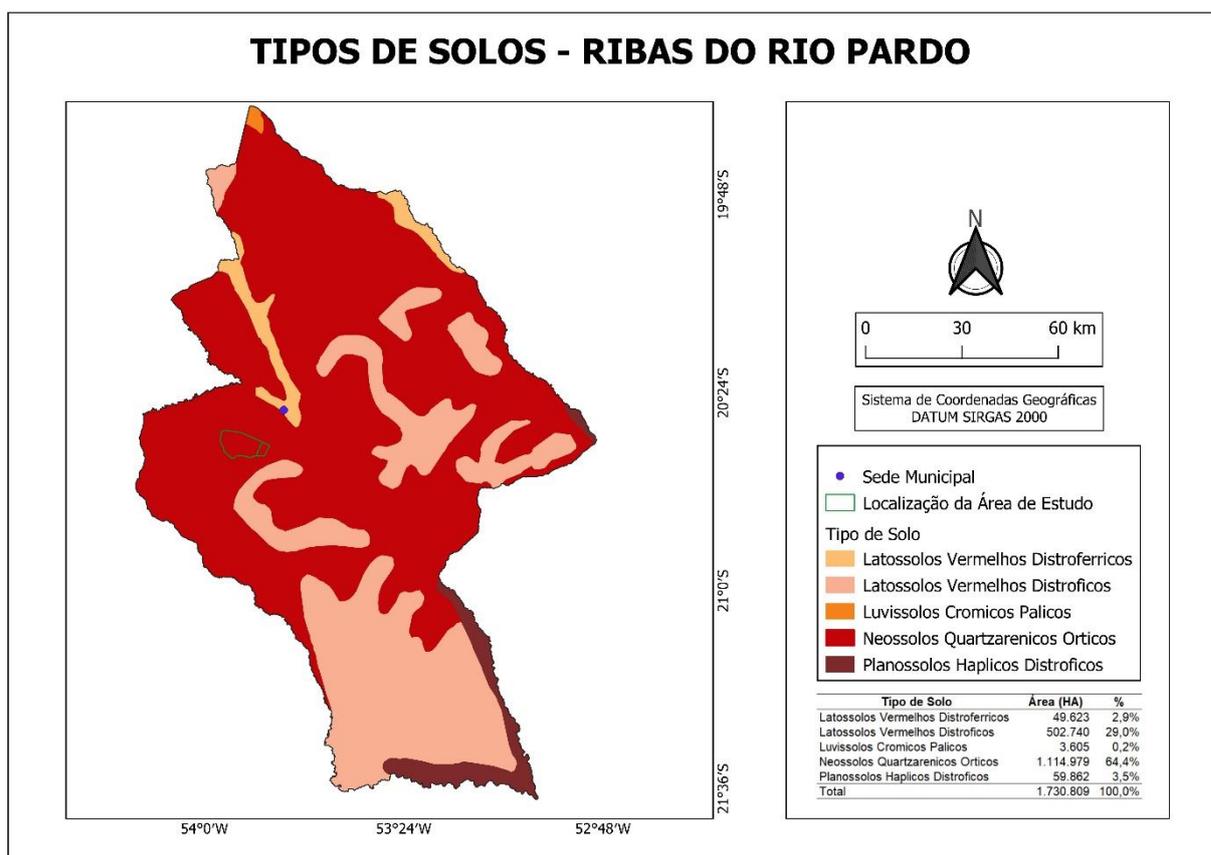


Figura 8 - Mapa dos tipos de solos do município de Ribas do Rio Pardo, MS.

O Neossolo Quartzarênico Órtico cobre 64,4% do município, incluindo toda área de estudo, seguido do Latossolo Vermelho Distrófico, representando 29,0% de cobertura. Os Planossolos Háplicos Distróficos, Latossolo Vermelho Distroférico e Luvisolos crômicos pálicos representam, respectivamente, 3,5%, 2,9% e 0,2% de cobertura. Já a área de estudo da presente pesquisa, é totalmente coberta pelo Neossolo Quartzarênico Órtico.

O Neossolo Quartzarênico Órtico é o tipo de solo predominante na região centro-leste do MS e no município de Ribas do Rio Pardo, de acordo com Santos et al. (2018). Com estrutura formada basicamente de grãos de quartzo, este solo possui pouca retenção de água, drenagem excessiva e lixiviação de nutrientes. Outro atributo

importante desse solo é a friabilidade elevada, característica, que juntamente com as citadas anteriormente, o torna um solo altamente suscetível aos processos erosivos superficiais e subsuperficiais, principalmente em locais onde o relevo possui alguma inclinação e sem cobertura vegetal (SCOPEL et al., 2013).

Para garantir a estabilidade estrutural das estradas encontradas nesse tipo de solo, é necessária atuação no favorecimento do escoamento superficial da água das vias. Uma solução seria implementar caixas de contenção e saídas d'água em uma distância menor, para que a água não acumule ao longo do leito da estrada. Além disso, é necessário o planejamento estratégico voltado ao revestimento primário ou secundário em locais onde haja maior fluxo de veículos, como estradas principais.

Na figura 9, é possível verificar o uso e ocupação da área de estudo.

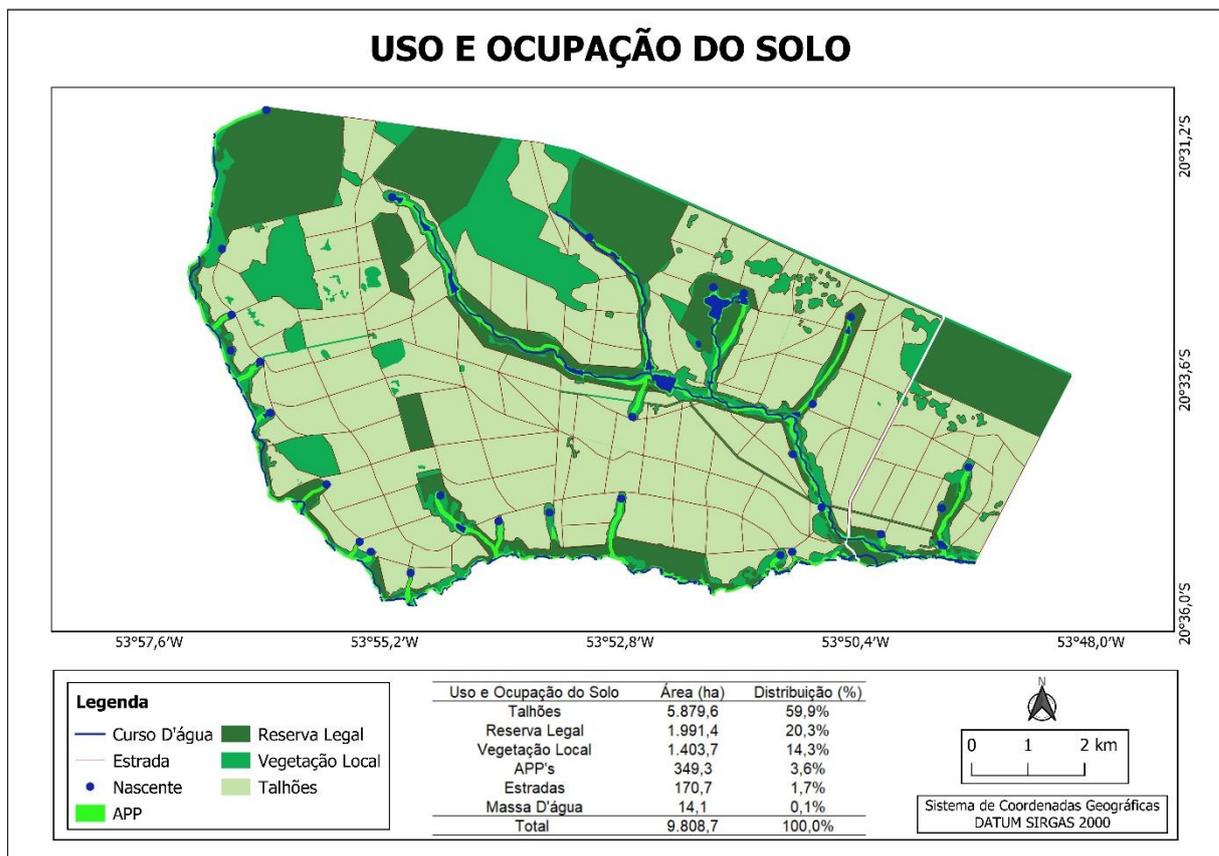


Figura 9 - Mapa do uso e ocupação do solo na fazenda de estudo, Ribas do Rio Pardo, MS.

As análises realizadas sobre o uso e ocupação do solo da área estudada, mostram que 59,9% da área total está direcionada ao plantio de eucalipto, correspondendo a 5.879,6 ha. As áreas voltadas à Reserva Legal e Áreas de Preservação Permanente, equivalem, respectivamente, a 20,3% e 3,6% (somando 2.340,7 ha). A vegetação local (cerrado remanescente ou regenerado) corresponde

a 14,3% da área total, o que representa 1.303,7 ha. Já os cursos d'água, represas, nascentes e brejos possuem 14,1 ha (0,1%). Por fim, 170,7 ha são estradas consolidadas, correspondendo a 1,7% da área total e 2,8% da área efetiva de plantio.

5.2. Análise de Declividade da Área

Por meio do MDE, gerado nas análises, é possível notar uma variação de altitude entre 357 e 535 metros ao nível do mar (Figura 10). No mapa também pode-se verificar o comportamento das curvas de nível presentes no local.

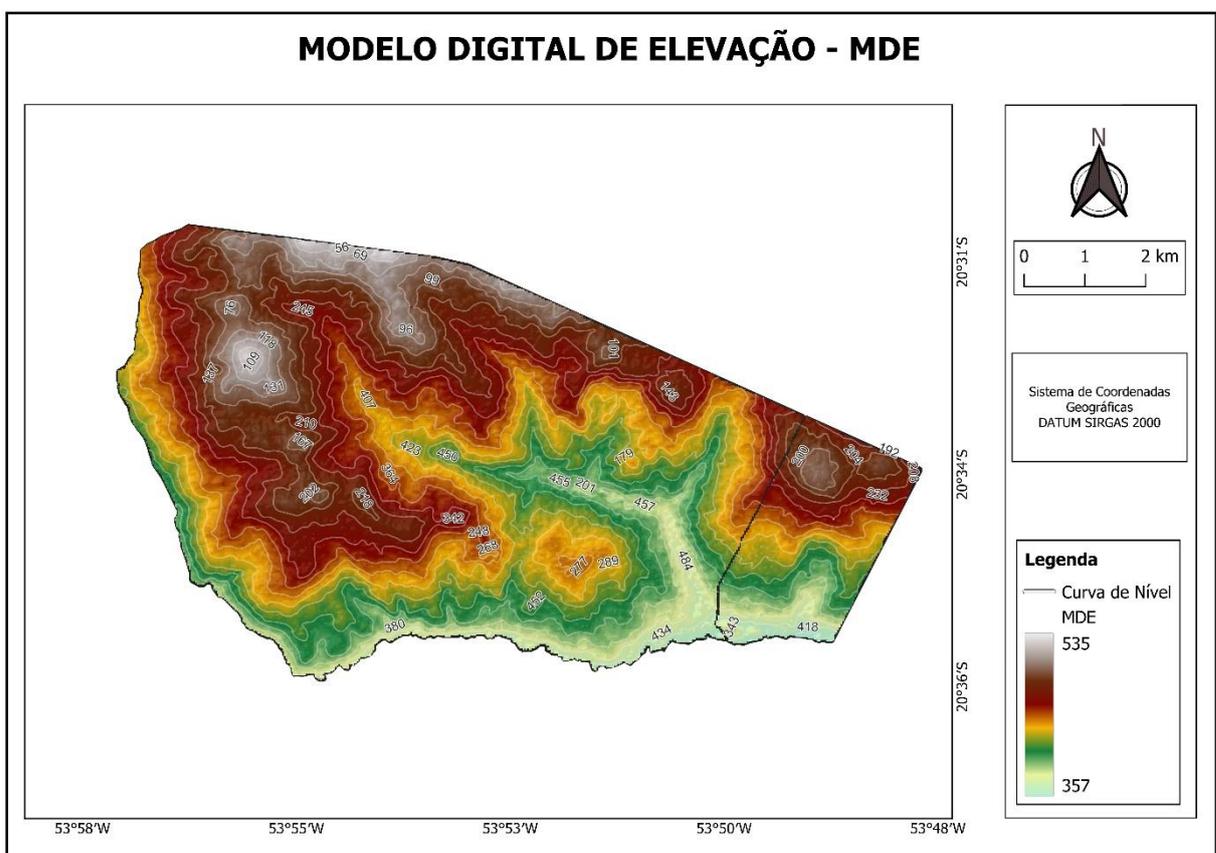


Figura 10 - Modelo Digital de Elevação da fazenda de estudo, localizada em Ribas do Rio Pardo, MS.

As técnicas de geoprocessamento, aliadas a produtos como o MDE, proporcionam inúmeras possibilidades de análise e estudos de diversas características de um determinado ambiente. Dentre elas, áreas com potencial erosivo (SILVEIRA et al., 2014).

Na Figura 11, é possível visualizar os intervalos de declividade obtidos nas análises. Observa-se que a região estudada não apresentou declividades na última

categoria definida pela Embrapa, ou seja, a área não possui declividade acima de 45% de elevação do relevo.

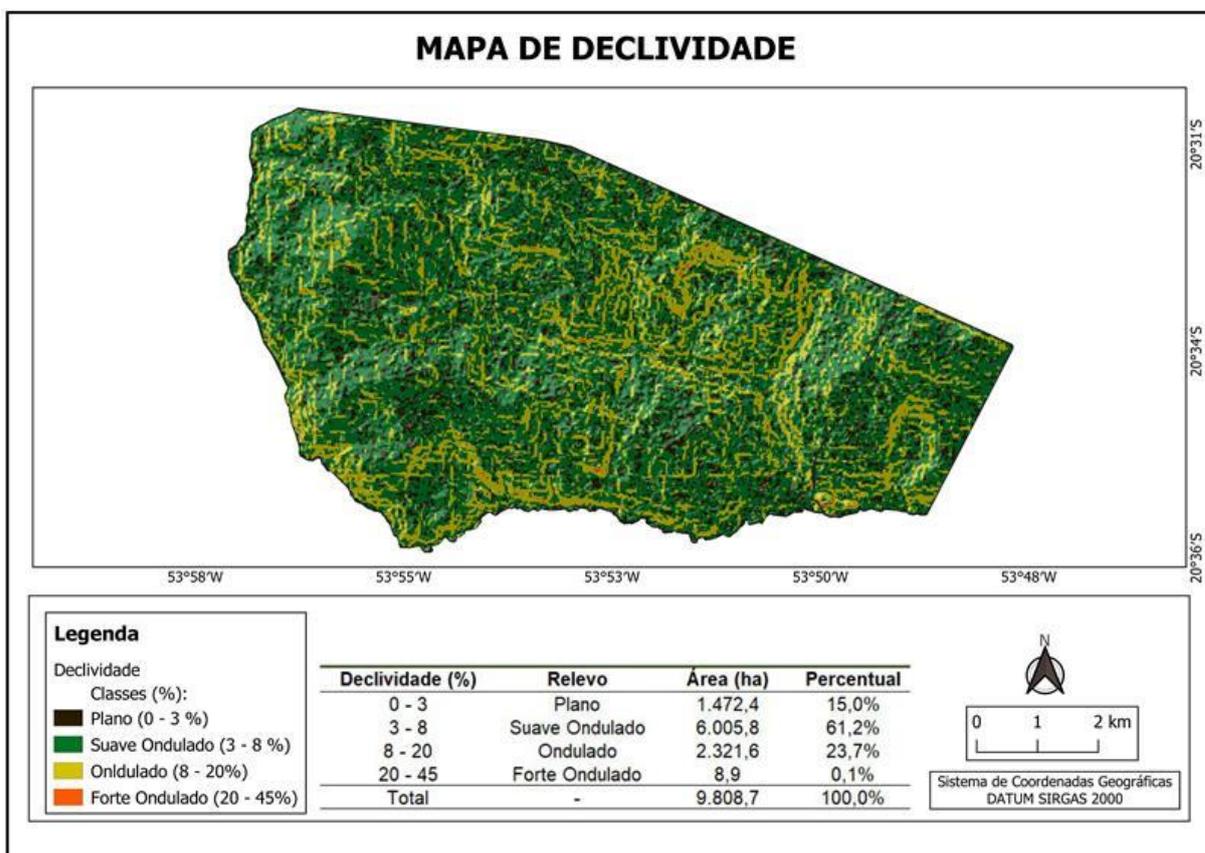


Figura 11 - Mapa de declividade da fazenda de estudo, localizada em Ribas do Rio Pardo, MS.

O relevo denominado suave ondulado destacou-se na área, representando 61,2% do total. O intervalo dessa classe variou de 3 a 8 % de declividade. Com 23,7%, o relevo ondulado (8 a 20%) ocupou a segunda posição dos resultados tratando-se de declividade, seguido do relevo plano (0 a 3%), que apresentou 15% de representatividade. O relevo forte ondulado (20 a 45%) mostrou-se pouco representativo na área, apresentando 0,1% de ocupação.

Devido à homogeneidade do tipo do solo, mesmo tipo climático e mesmo bioma predominante, a característica mais variável no local é a declividade. Esse atributo, pode ser considerado um balizador de tomada de decisão quanto à alocação ou realocação de estradas, a escolha do manejo adequado à área, tipo de equipamento a ser utilizado nas operações de silvicultura e malha viária e época do ano de colheita florestal (RÖNNQVIST et al., 2015). A variável declividade, agrupada ao tipo de solo,

potencializa a susceptibilidade à erosão, principalmente em declividades acima de 8% (SANTOS et al., 2018).

5.3. Análises de Estradas

5.3.1. Classificação das estradas da área de estudo

A Figura 12 apresenta a classificação de estradas da área estudada.

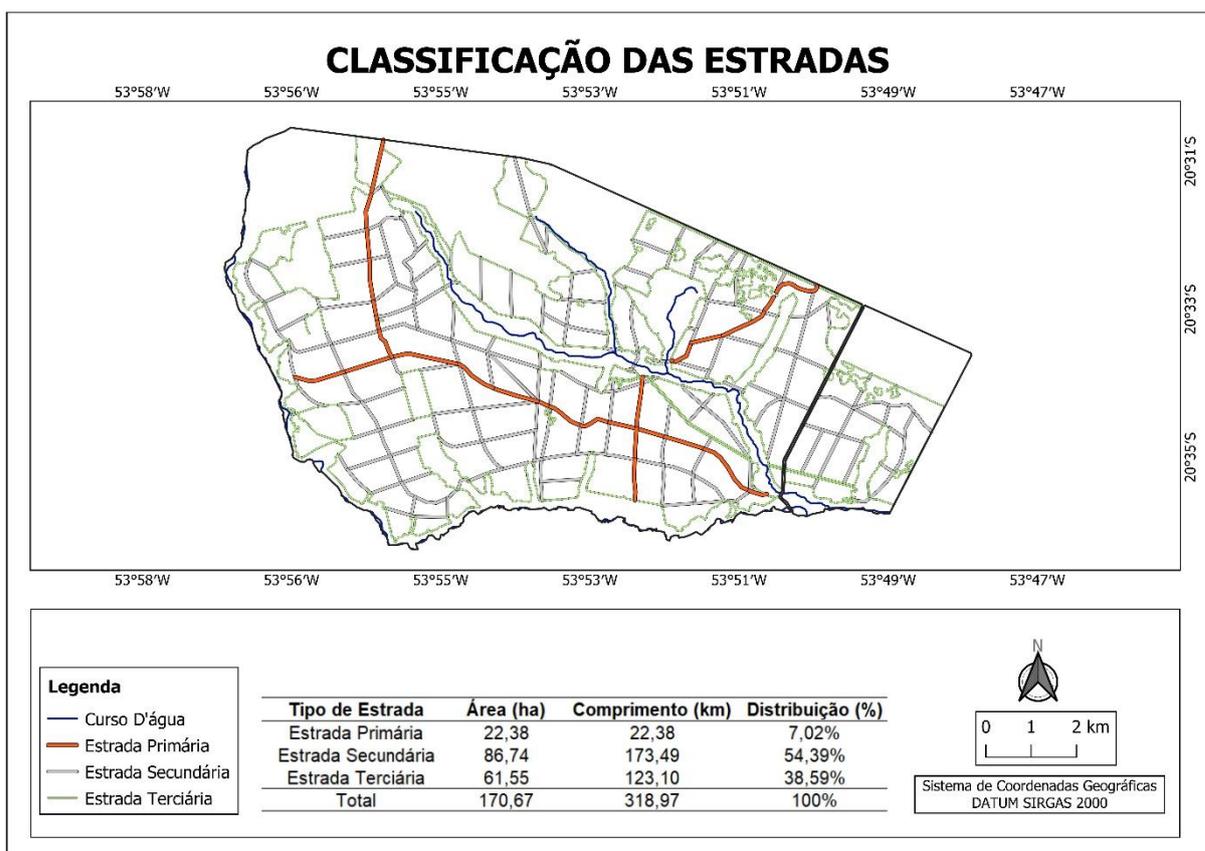


Figura 12 - Distribuição dos tipos de estradas na fazenda de estudo, localizada em Ribas do Rio Pardo, MS.

Pode-se verificar que as estradas secundárias, representam 54,39% da malha viária total. Seguido pelas estradas terciária, que representa 38,59% das vias. As estradas primárias, representam 7,02% da malha viária, com 22,38 km de percurso. Outra informação importante é a densidade de estradas total em relação a área efetiva de plantio do local de estudo, que corresponde a 52,72 m.ha⁻¹.

Este resultado corrobora com o critério utilizado com Machado (1989), classifica as estradas primárias ou dupla, como aquelas que possui pista de rolamento com duas faixas e largura superior a 7 m, o que permite que dois veículos possam cruzar

ou ultrapassar, gerando uma grande competitividade em relação a estrada secundária/aceiro ou simples.

Outro fator importante na classificação das estradas é a presença ou não de revestimento primário (MACHADO, 1989). As estradas primárias da área de estudo, apresentam revestimento com material primário acrescido de material britado, o que garante o tráfego de veículos durante todo o ano. As demais estradas, apresentam revestimento em locais estratégicos ou é feito algo paliativo apenas em período de transporte de madeira, em locais que apresentam risco operacional, como os declives.

5.3.2. Determinação de pontos críticos do transporte florestal

A sobreposição das estradas sob a classificação da declividade, mostra que existem pontos de atenção quando se trata do transporte de madeira, como pode ser visualizado na Figura 13.

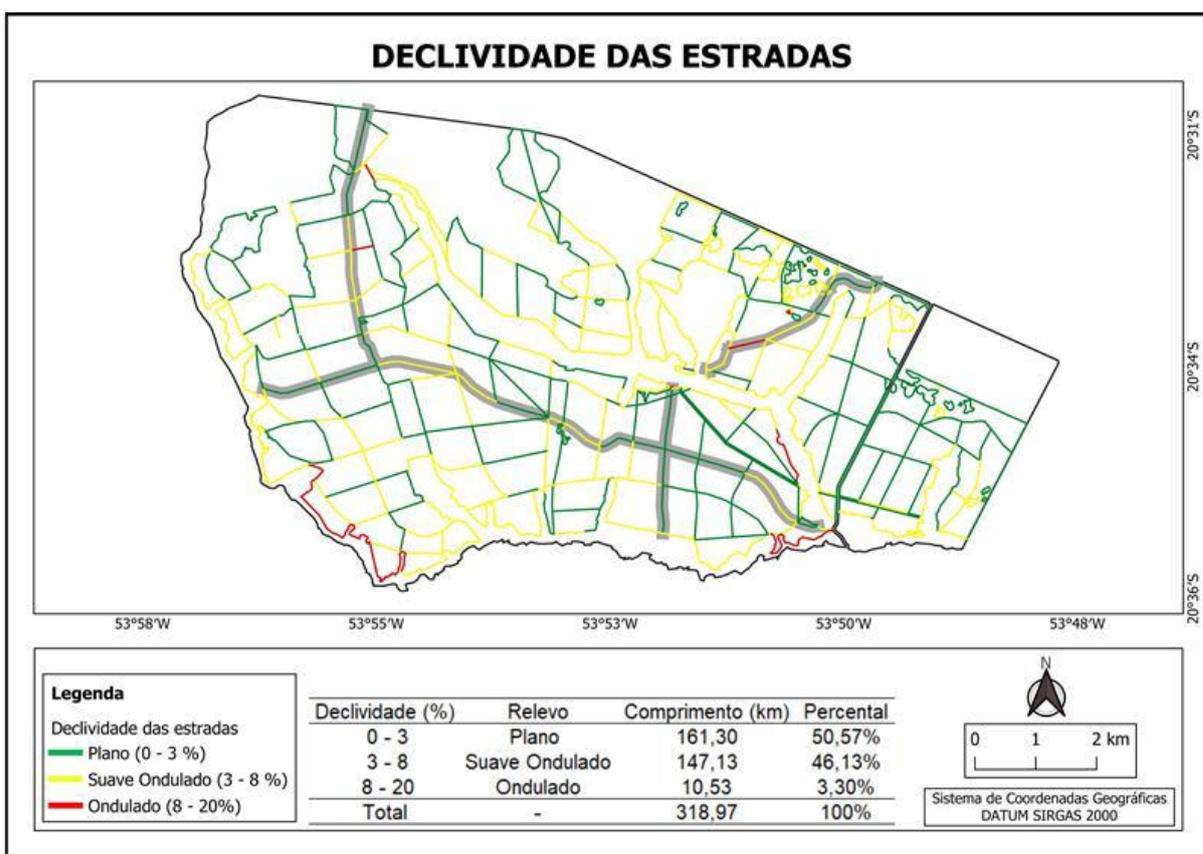


Figura 13 – Mapa com a declividade das estradas com base na classificação da Embrapa.

As estradas implantadas em relevo plano representam 50,57% da malha viária total, sendo o mais predominante, onde a declividade corresponde de 0 a 3% de

inclinação. Esse cenário não é considerado impeditivo à operação de transporte florestal, mesmo em período chuvoso. O relevo suave ondulado possui representatividade de 46,13%. Este tipo de relevo não é considerado um item impeditivo ao transporte florestal em período seco e estrada cascalhada, no cenário de CVC do tipo bitrem e tritrem. O aumento de percentual relacionado a declividade das estradas, está diretamente relacionado aos processos erosivos, ressaltando a erosão hídrica, pois essa influencia a velocidade do fluxo de água e a diminuição da infiltração de água no solo (EL KATEB et al., 2013).

Segundo Meignan, Frayret e Pesant (2015), a declividade associada ao tipo de solo e drenagem do terreno, é um critério importante para determinar a viabilidade das estradas, custo de alocação e de manutenção. As estradas que englobam o relevo plano ou suave ondulado, tendem a minimizar os custos com manutenção periódica e apresentam maior segurança operacional para o transporte de madeira. Segundo Corrêa et al. (2006), quanto menor o declive de uma estrada, menor será o custo com manutenção em declividades menores que 10%, possibilitando um trânsito mais eficiente.

As estradas localizadas em pontos onde o relevo é ondulado, entre 8 a 20%, representam 3,30% da malha viária estudada. Elas devem ser utilizadas de forma estratégica para o transporte de madeira, como rota adequada para veículos vazios e carregados, disponibilização de veículos de apoio ao transporte, dentre outras. Isso porque são locais que apresentaram maior declividade e por esse motivo são considerados pontos críticos.

Analisando por tipo de CVC, a área de estudo atende a demanda do bitrem em 99,1%, para o tritrem em 96,7%, e para o hexatrem o local de estudo foi apto em 82,7% (Figura 14). Esses fatos corroboram com a importância de realizar um bom planejamento, visando o tipo de CVC a ser operacionalizado na fazenda. A fim de que não ocorra imprevistos como o desabastecimento da fábrica ou baixa performance da frota, por questões relacionadas a limitação de atuação do CVC por conta da declividade.

Os pontos críticos são todos aqueles trechos apresentados no mapa acima, com coloração vermelha. Isso porque são os pontos que apresentaram maior declividade das estradas e onde é necessário ter maior critério para definir premissas e estratégias para o transporte de madeira.

Segundo estudo realizado por Malinovski (2010), a declividade máxima calculada possível de ser vencida por um Tritrem e um Rodotrem (9 eixos) carregado em uma estrada de leito natural é de 8,0%. Para o Bitrem e Romeu e Julieta (7 eixos) este limite é de 11,4%. Segundo o mesmo autor, esse percentual pode ser alterado caso exista o revestimento e preparo dessas estradas. Quanto ao CVC do tipo hexatrem, ainda é carente de estudos, servido apenas as bases de conhecimento prático das empresas florestais as referências sobre o tema.

Segundo Machado (2013) do ponto de vista econômico, pode-se optar por declives mais acentuados, visando diminuir a distância do transporte, porém isso poderá ocasionar elevação dos custos de manutenção dos veículos. A recomendação é que se utilize essas estradas para o tráfego de veículos carregados apenas em deslocamento no sentido de declive.

PONTOS CRÍTICOS PARA O TRANSPORTE FLORESTAL

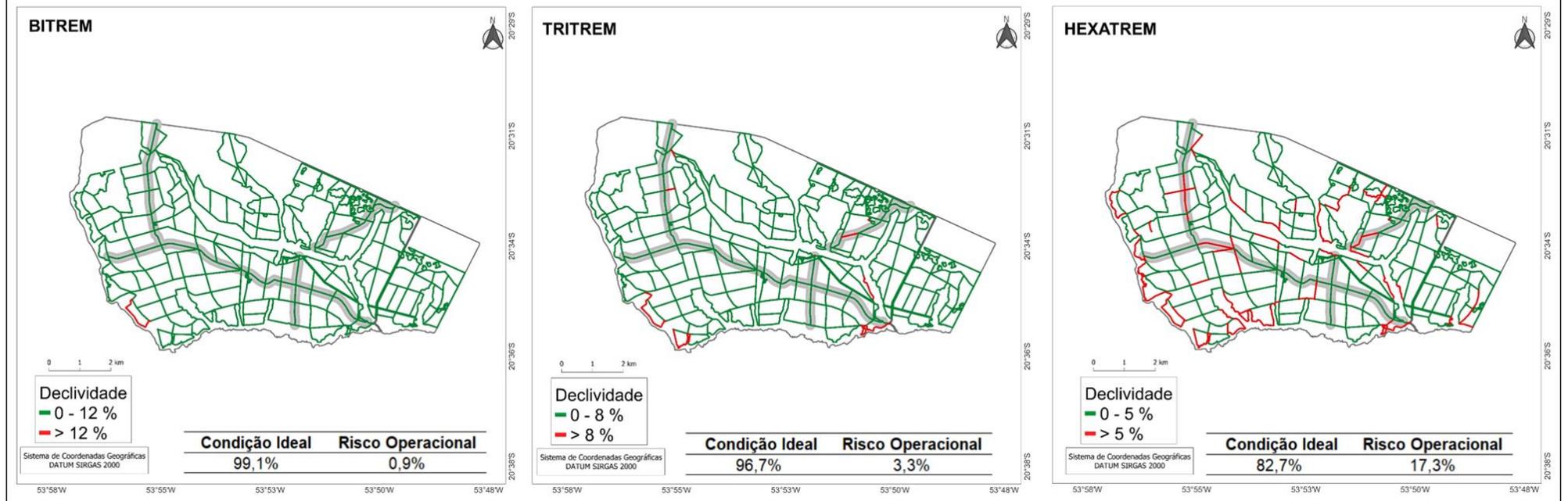


Figura 14 - Mapa com os pontos críticos ao transporte florestal, na área de estudo por tipo de CVC, localizada em Ribas do Rio Pardo, MS.

5.4. Custos Operacionais e Densidade de Estradas

Os custos das operações de estradas, de extração, e de perda de área produtiva nas condições atuais, ótima e em função da capacidade de estocagem das estradas, para os nove cenários de interação do VMI com CVC, estão descritas na tabela 8.

O custo de produção atual, na densidade de estradas de 52,72 m.ha⁻¹ e distância média de extração (DME) de 85 metros, considerando um VMI 0,15 m³.árvore⁻¹, foi de R\$ 13,34, R\$ 14,61 e R\$ 18,85 por m³ de madeira, respectivamente, para os CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem.

Considerando um VMI de 0,20 m³.árvore⁻¹, os custos ficaram menores, em função da diluição do custo fixo pelo maior volume de madeira, respectivamente para os cenários de bitrem, tritrem e hexatrem, os custos encontrados foram, R\$ 12,05, R\$ 13,00 e R\$ 16,18 por m³ de madeira. Já considerando o cenário de maior VMI (0,25 m³.árvore⁻¹), os custos foram, respectivamente, para os cenários de bitrem, tritrem e hexatrem, R\$ 10,42, R\$ 11,18, R\$ 13,73 por m³ de madeira. Os custos apresentaram-se mais competitivos comparados com os demais VMI. Isso se dá pela maior diluição dos custos empregados na operação florestal (BONAZZA, 2019).

Tabela 8 - Variáveis físicas e financeiras referentes a densidade atual, densidade ótima e densidade de estradas em função da capacidade de estocagem nos diferentes cenários de VMI e CVC de transporte florestal.

Variáveis	Cenário de Custo da DE Atual (R\$.m ⁻³)								
	VMI - 0,15 (m ³ .árvore ⁻¹)			VMI - 0,20 (m ³ .árvore ⁻¹)			VMI - 0,25 (m ³ .árvore ⁻¹)		
	Bitrem	Tritrem	Hexatrem	Bitrem	Tritrem	Hexatrem	Bitrem	Tritrem	Hexatrem
Cext (R\$.m ⁻³)	R\$ 5,74	R\$ 5,74	R\$ 5,74	R\$ 5,51	R\$ 5,51	R\$ 5,51	R\$ 4,51	R\$ 4,51	R\$ 4,51
Cest (R\$.m ⁻³)	R\$ 2,26	R\$ 3,53	R\$ 7,77	R\$ 1,70	R\$ 2,65	R\$ 5,83	R\$ 1,36	R\$ 2,12	R\$ 4,66
Cpap (R\$.m ⁻³)	R\$ 5,34	R\$ 5,34	R\$ 5,34	R\$ 4,85	R\$ 4,85	R\$ 4,85	R\$ 4,55	R\$ 4,55	R\$ 4,55
CT (R\$.m⁻³)	R\$ 13,34	R\$ 14,61	R\$ 18,85	R\$ 12,05	R\$ 13,00	R\$ 16,18	R\$ 10,42	R\$ 11,18	R\$ 13,73
EE (m)	190	190	190	190	190	190	190	190	190
DME (m)	85	85	85	85	85	85	85	85	85
DE (m.ha⁻¹)	52,72	52,72	52,72	52,72	52,72	52,72	52,72	52,72	52,72
Variáveis	Cenário de Custo da DE Ótima (R\$.m ⁻³)								
Cext (R\$.m ⁻³)	R\$ 7,49	R\$ 7,78	R\$ 8,62	R\$ 7,03	R\$ 7,25	R\$ 7,93	R\$ 6,86	R\$ 7,05	R\$ 7,63
Cest (R\$.m ⁻³)	R\$ 1,10	R\$ 1,59	R\$ 2,88	R\$ 0,84	R\$ 1,23	R\$ 2,26	R\$ 0,71	R\$ 1,05	R\$ 1,95
Cpap (R\$.m ⁻³)	R\$ 2,59	R\$ 2,40	R\$ 1,98	R\$ 2,41	R\$ 2,25	R\$ 1,88	R\$ 2,38	R\$ 2,25	R\$ 1,90
CT (R\$.m⁻³)	R\$ 11,17	R\$ 11,76	R\$ 13,48	R\$ 10,27	R\$ 10,73	R\$ 12,08	R\$ 9,95	R\$ 10,34	R\$ 11,49
EE (m)	391	422	511	382	409	489	362	384	453
DME (m)	176	190	230	172	184	220	163	173	204
DE (m.ha⁻¹)	25,57	23,68	19,57	26,16	24,46	20,45	27,61	26,01	22,06
Variáveis	Cenário de Custo da DE com Restrição da Cestoque (R\$.m ⁻³)								
Cext (R\$.m ⁻³)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	R\$ 7,33
Cest (R\$.m ⁻³)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	R\$ 2,12
Cpap (R\$.m ⁻³)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	R\$ 2,07
CT (R\$.m⁻³)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	R\$ 11,51
EE (m)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	418
DME (m)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	188
DE (m.ha⁻¹)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	23,94

Legenda: VMI: volume médio individual; CT: custo total; Cest: custo de estradas; Cext: custo de extração; Cpap: custo de perda de área produtiva; DE: densidade atual; DOE: densidade ótima; DME; distância média de extração; EE: espaçamento entre estradas; Cestoque: capacidade de estocagem das estradas; NA: não foi necessário restringir pela Cestoque.

Quanto maior o VMI, normalmente, tende a encontrar um menor custo operacional variável, R\$.m⁻³ (Figura 15). Na extração de madeira, este fato deve-se pela maior eficiência na relação do tempo empregado produtivo com deslocamento. Sendo assim, seria necessário menos ciclos para completar uma carga no *forwarder* (ZAGONEL, 2005; OLIVEIRA, 2013). Já nas estradas, ocorre a diluição do custo fixo de construção e manutenção pelo maior volume produzido, ou seja, o investimento na estrada para transporte de mais madeira seria praticamente o mesmo.

O mesmo efeito também influencia o custo de perda de área produtiva, onde ocorre uma maior diluição do custo fixo pelo maior volume produzido da floresta (SOUZA, 2016; FARIA, 2020).

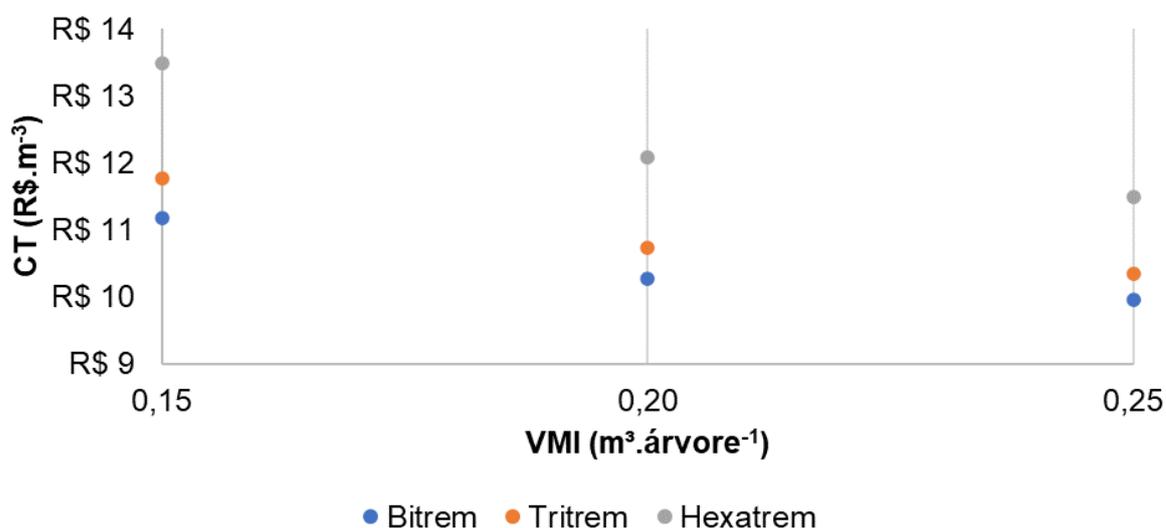


Figura 15 – Relação dos diferentes VMI e CVC no custo total da madeira com base na DOE.

Nos cenários de DOE, todos os custos de extração foram maiores que o cenário atual de DE, pois, com a redução da densidade houve um aumento da distância média de extração, em virtude da redução da quantidade de estradas. Conseqüentemente, ocorre redução na produtividade do *forwarder*, pois a máquina terá que se deslocar mais, e assim, apresentando um aumento do custo variável em R\$.m⁻³ de extração de madeira. Corroborando com os estudos de Souza (2018) e Faria (2020), que também evidenciaram o aumento do custo de extração nos cenários de DOE.

A relação dos custos de estradas e perda de área produtiva com a DOE, apresentou relação inversamente proporcional ao custo de extração. Verificou-se que

a diminuição da DE afetou de forma proporcional esses custos, em virtude da DOE ser menor que a densidade encontrada (Figura 16). Com isso, as áreas terão menos estradas para construir ou realizar manutenção e, conseqüentemente, mais área efetiva será convertida em plantio. Estes fatos também foram verificados nos trabalhos de Zagonel (2005) e Bonazza (2019).

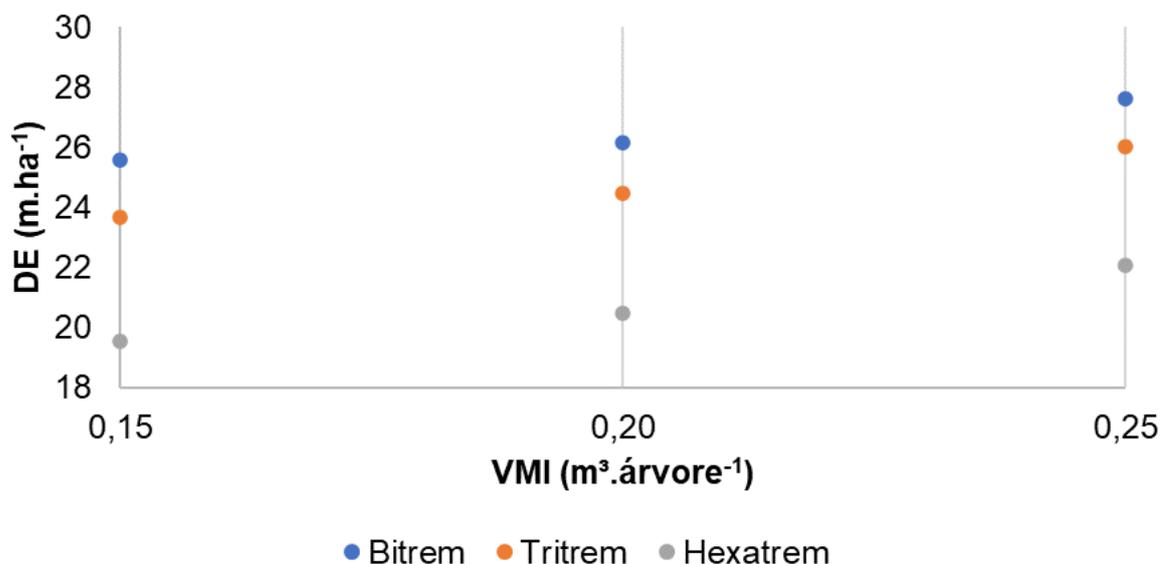


Figura 16 – Relação dos diferentes VMI e CVC na densidade de estradas com base na DOE.

Analisando a DOE, para o VMI de 0,15 m³.árvore⁻¹, encontrou-se diferentes valores para as CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem, sendo respectivamente, 25,57, 23,68 e 19,57 m.ha⁻¹ de estradas (Figura 17). Já os custos ótimos de produção nos cenários supracitados, foram de R\$ 11,17, R\$ 11,76 e R\$ 13,48 por m³, respectivamente, para os CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem.

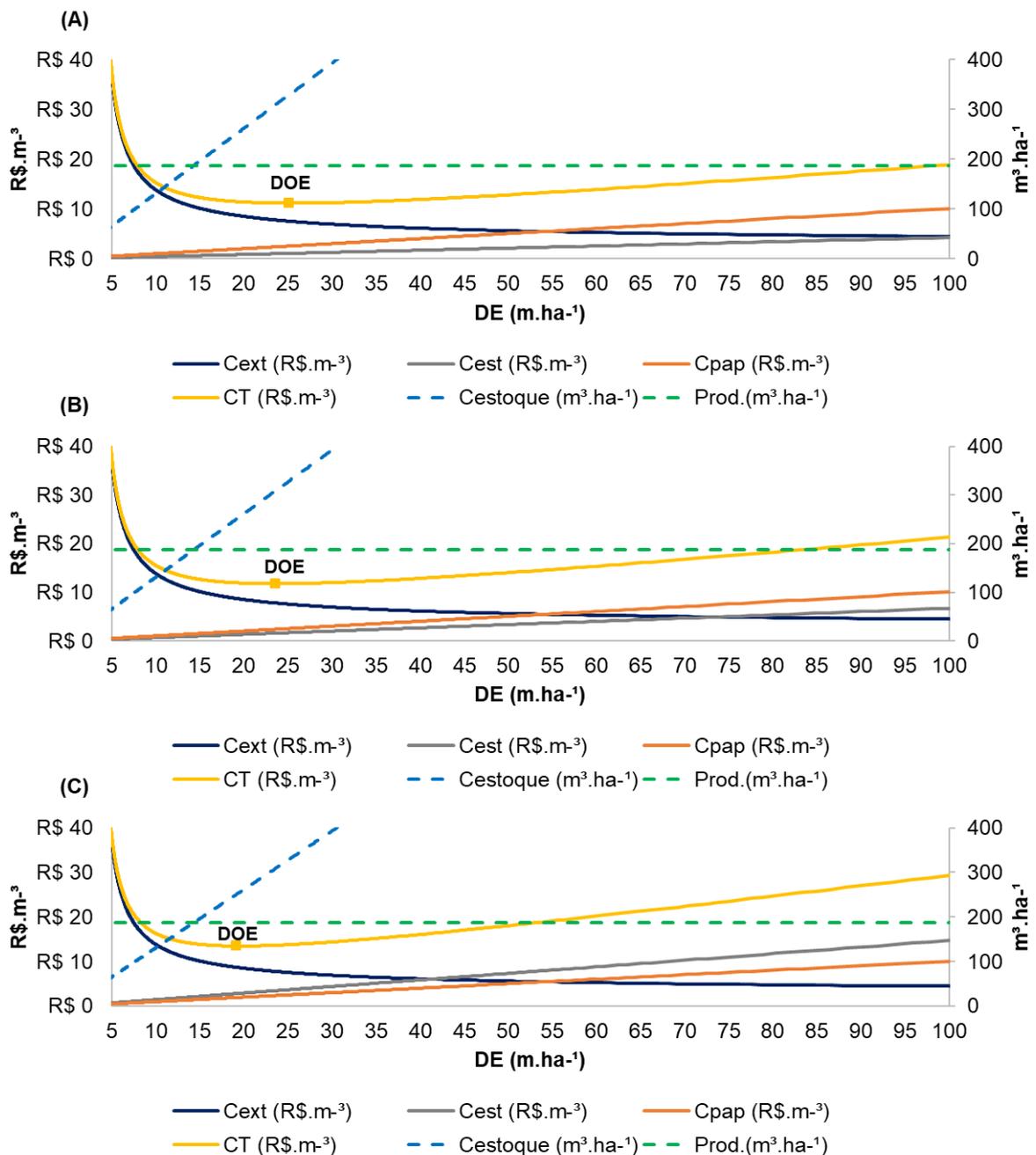


Figura 17 - Relação entre densidade de estradas, custo de estradas, custo de extração, custo de perda de área de produtiva, produtividade da área e capacidade máxima de estocagem para Bitrem (A), Tritrem (B) e Hexatrem (C) no cenário de VMI de $0,15 m^3 \cdot \text{árvore}^{-1}$.

Legenda: CT: custo total; Cest: custo de estradas; Cext: custo de extração; Cpap: custo de perda de área produtiva; DE: Densidade estradas; DOE: densidade ótima de estradas; Cestoque: capacidade de estocagem das estradas.

Para o cenário de VMI de $0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{árvore}^{-1}$, verificou-se também diferentes DOE para os CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem, sendo respectivamente, 26,16, 24,46 e $20,45 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$ de estradas (Figura 18). Já os custos ótimos de produção total nos cenários supracitados foram de R\$ 10,27, R\$ 10,73 e R\$ 12,08 por m^3 , respectivamente, para os CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem.

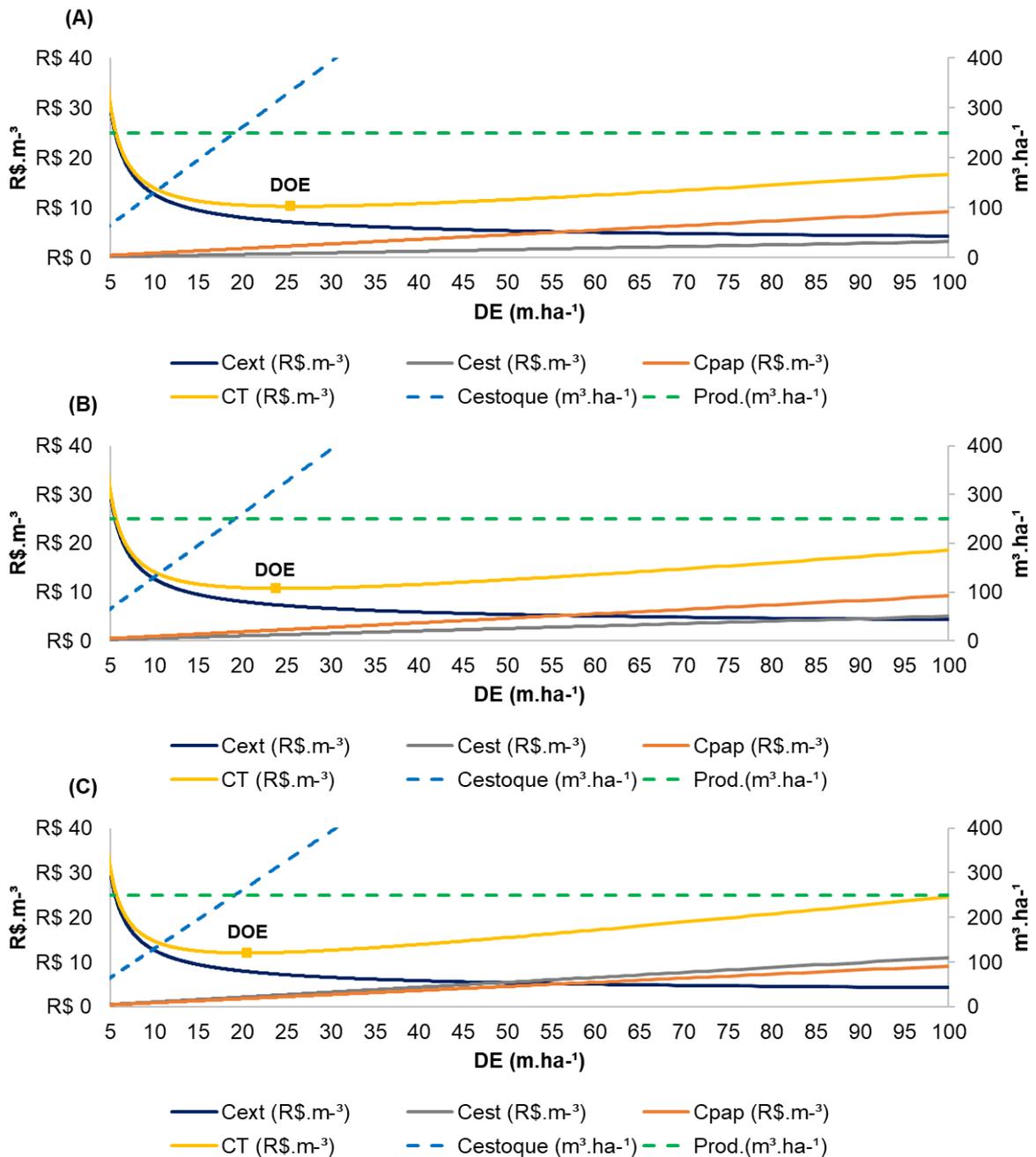


Figura 18 - Relação entre densidade de estradas, custo de estradas, custo de extração, custo de perda de área de produtiva, produtividade da área e capacidade máxima de estocagem para Bitrem (A), Tritrem (B) e Hexatrem (C) no cenário de 0,20 m³.árvore⁻¹.

Legenda: CT: custo total; Cest: custo de estradas; Cext: custo de extração; Cpap: custo de perda de área produtiva; DE: Densidade estradas; DOE: densidade ótima de estradas; Cestoque: capacidade de estocagem das estradas.

Por fim, o cenário de VMI de $0,25 \text{ m}^3.\text{árvore}^{-1}$, também apresentou diferentes DOE para os CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem, sendo respectivamente, 27,61, 26,01 e $22,06 \text{ m}.\text{ha}^{-1}$ de estradas (Figura 19). Já os custos ótimos de produção nos cenários acima ficaram em R\$ 9,95, R\$ 10,34 e R\$ 11,49 por m^3 , respectivamente, para os CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem.

O único caso em que foi encontrado uma restrição da capacidade de estocagem das estradas, foi no cenário de VMI de $0,25 \text{ m}^3.\text{árvore}^{-1}$ com o CVC do tipo hexatrem. Neste cenário, foi encontrado uma densidade de estradas que suporta o volume de madeira teoricamente produzido, de no mínimo $23,94 \text{ m}.\text{ha}^{-1}$, sendo 7,85% maior que a densidade ótima economicamente. Já os custos totais da madeira foram de R\$ 11,51 por m^3 . O aumento no custo em relação ao melhor cenário econômico foi de apenas R\$ 0,02 por m^3 .

A menor DOE foi encontrada para as CVC de maior peso bruto total combinado (PBTC), pois estes veículos demandam maiores investimentos em construção e manutenção de estradas. Este fator influenciou também para que haja uma maior distância média de extração da madeira e uma menor perda de área produtiva.

Já os maiores custos foram encontrados nos cenários de CVC de maior PBTC. Isso porque, o maior investimento em estradas, de acordo com a lista técnica da empresa florestal, é o investimento em estradas para o hexatrem, isso equivale a mais que o dobro do investimento relacionado ao CVC do tipo tritrem. Devido a extensão e massa do veículo, demanda-se mais a capacidade de arraste do caminhão e conseqüentemente apresenta maior desgaste das estradas. Isso faz com que necessite de maior investimento em material britado para revestir as estradas e maior periodicidade de manutenção.

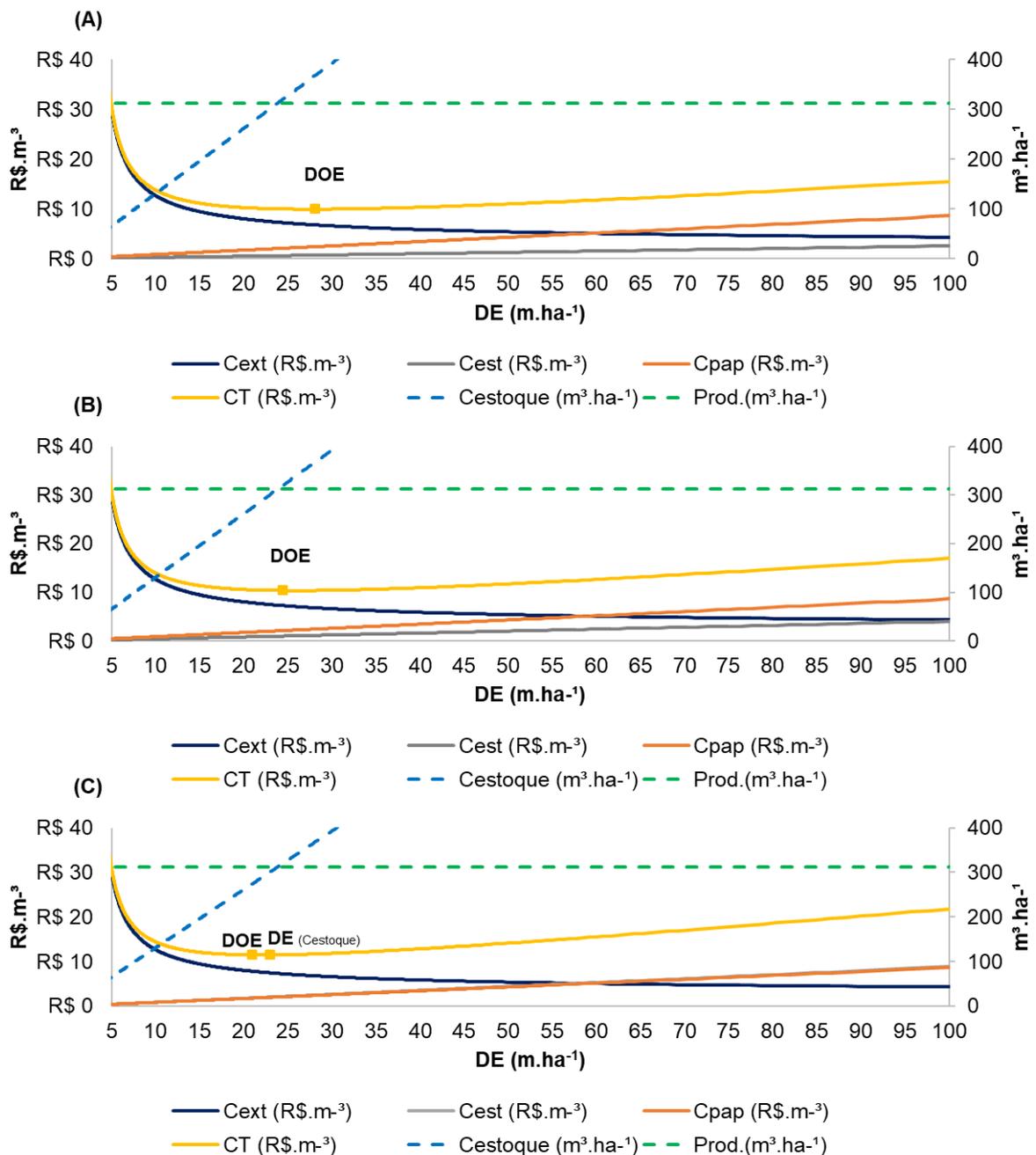


Figura 19 - Relação entre densidade de estradas, custo de estradas, custo de extração, custo de perda de área de produtiva, produtividade da área e capacidade máxima de estocagem para Bitrem (A), Tritrem (B) e Hexatrem (C) no cenário de 0,25 m³.árvore⁻¹.

Legenda: CT: custo total; Cest: custo de estradas; Cext: custo de extração; Cpap: custo de perda de área produtiva; DE: Densidade estradas; DOE: densidade ótima de estradas; Cestoque: capacidade de estocagem das estradas.

Aplicando a análise da DOE, haveria uma redução de custo total da madeira de até 28,49%, no cenário de VMI de 0,15 m³.árvore⁻¹ com CVC do tipo hexatrem, de 19,51% no mesmo VMI, porém, com CVC do tipo tritrem, e de 16,28% no CVC do tipo bitrem. Essas mesmas tendências, também foram encontradas nos demais VMI do estudo. A redução potencial de custo no cenário de VMI de 0,20 m³.árvore⁻¹ foi de 14,73%, 17,46% e de 25,37%, representa respectivamente, os CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem. Já no cenário de VMI de 0,25 m³.árvore⁻¹ as reduções potenciais de custos foram de 4,52%, 7,57% e 16,32%, sendo respectivamente, bitrem, tritrem e hexatrem (Figura 20).

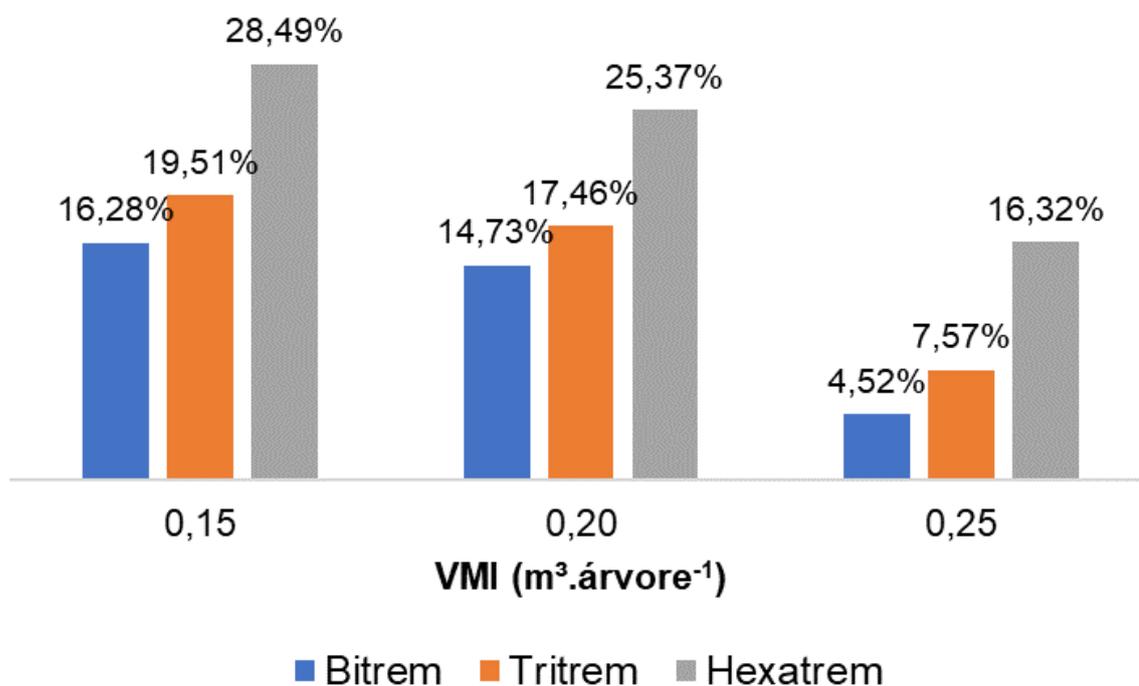


Figura 20 - Redução do custo total da operação nos diferentes cenários de VMI e CVC com base na DOE.

Faria (2020) nas mesmas condições de terreno plano e plantio de Eucalipto deste estudo, encontrou redução de custos totais de 24,9%. Para plantio de Eucalipto em área declivosa, a redução de custos totais foi de 25,4%.

Essa tendência demonstra que, para as áreas menos produtivas devemos redobrar a atenção do planejamento da malha viária florestal, pois com uma menor produtividade, tende-se a ter menos volume na diluição dos custos fixos operacionais, em especial o de estradas para veículos de maiores PBTC.

A mesma tendência também ocorreu na redução da densidade de estradas nos diferentes cenários de VMI e CVC. Quanto maior o PBTC e menor a produtividade da área, maior é a redução proposta na melhor densidade de estradas do ponto de vista econômico (Figura 21).

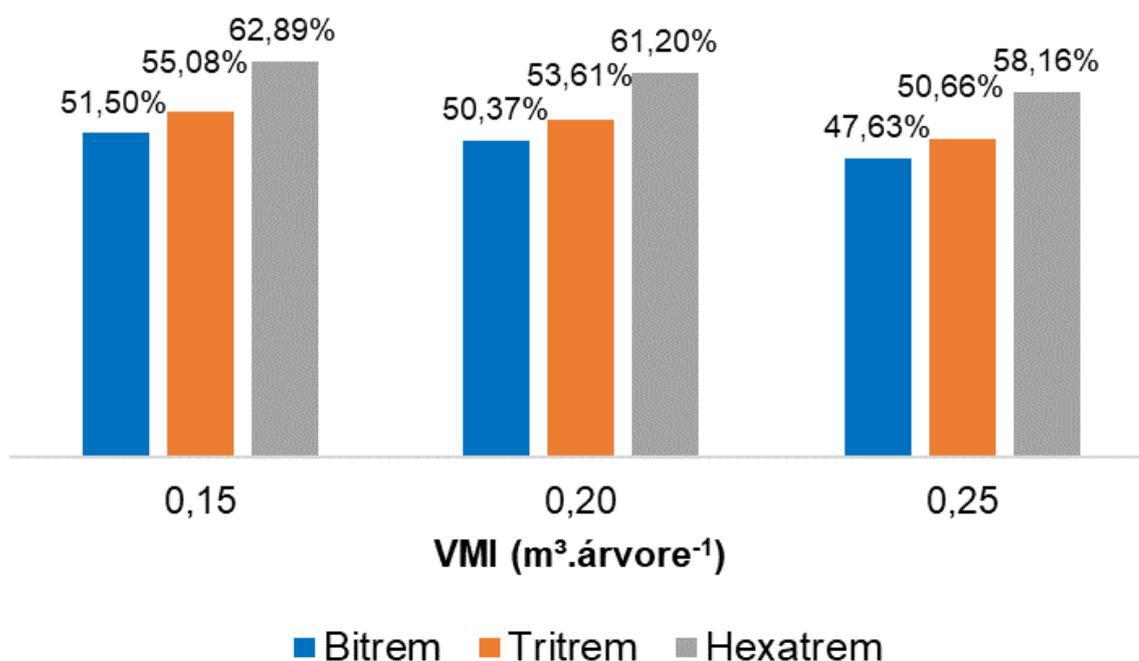


Figura 21 - Redução da densidade de estradas nos diferentes cenários de VMI e CVC com base na DOE.

Souza (2016) em seu estudo encontrou reduções na densidade de estradas do cenário atual para o ótimo variando de 42% a 65% em plantio de Pinus no estado de Santa Catarina. Faria (2020) encontrou reduções de 47,1% a 72,8% para áreas planas, com plantio de Eucalipto e Pinus, respectivamente, e de 57,8% a 63,9% nas mesmas espécies, respectivamente, porém em relevo declivoso. Isso reforça que a maioria das áreas de plantio florestal, estejam passíveis de otimização do cenário atual de densidade de estradas.

5.5. Tamanho do Talhão em Função da DE

Na Figura 22 é possível observar a relação entre a densidade das estradas e o tamanho mínimo e máximo sugerido dos talhões. O tamanho ideal do talhão, baseia-se nas distâncias do espaçamento entre as estradas (EE), pelo comprimento sugerido de talhão em áreas planas (500 m e 1.000 m), conforme Simões et al. (1981) apud Pereira Neto (1995).

Observa-se que quanto maior é a densidade de estradas, menor é o tamanho médio do talhão, pois conseqüentemente, será menor o espaçamento entre as estradas, sem considerar VMI e tipo de CVC.

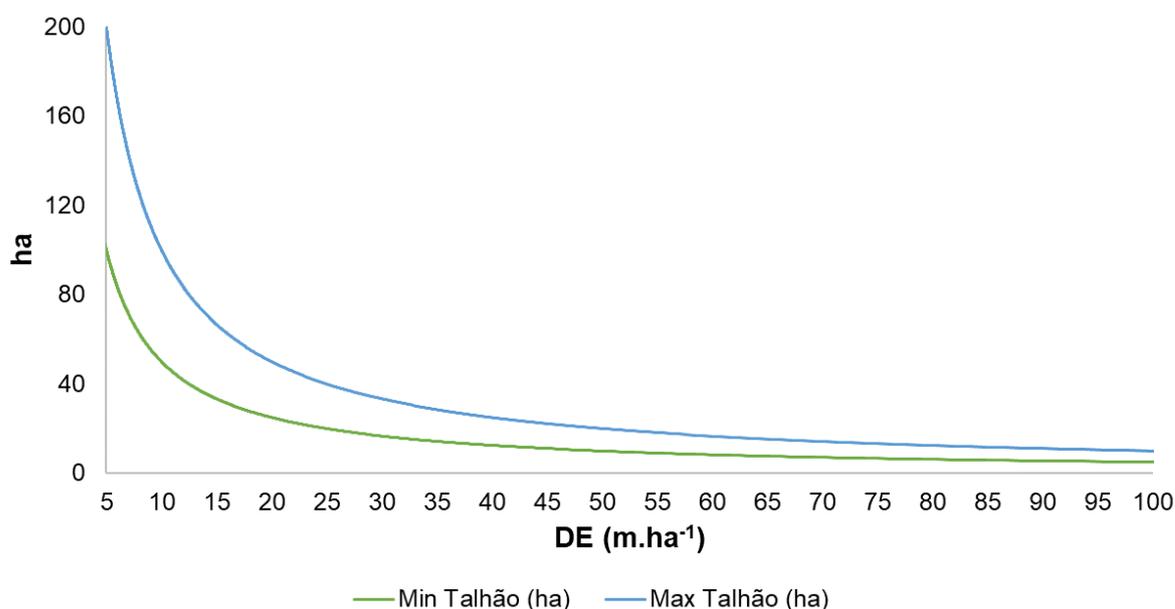


Figura 22 - Relação entre densidade de estradas e tamanho mínimo e máximo dos talhões.

Legenda: DE: densidade de estradas; VMI: volume médio individual; Min Talhão: tamanho mínimo do talhão; Max Talhão: tamanho máximo do talhão.

Para o VMI de $0,15 \text{ m}^3.\text{árvore}^{-1}$, o tamanho mínimo e máximo ideal do talhão, variou de 20 a 39 ha, 21 a 42 ha e 26 a 51 ha, respetivamente, para os CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem. Para o VMI de $0,20 \text{ m}^3.\text{árvore}^{-1}$, o tamanho ideal mínimo e máximo do talhão, foi menor que o VMI anterior, variando de 19 a 38 ha, 20 a 41 ha e 24 a 49 ha, respetivamente, para os CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem. Já no VMI de $0,25 \text{ m}^3.\text{árvore}^{-1}$, este apresentou o menor tamanho de talhão ideal, a variação do

mínimo e máximo, foi de 18 a 36 ha, 19 a 38 ha e 23 a 45 ha, respetivamente, para os CVC do tipo bitrem, tritrem e hexatrem (Tabela 9).

Tabela 9 - Tamanho mínimo e máximo dos talhões com base no espaçamento ótimo de estradas nos diferentes cenários de VMI e CVC.

Min Talhão (ha)			
VMI (m³.árvore⁻¹)	Bitrem	Tritrem	Hexatrem
0,15	20	21	26
0,20	19	20	24
0,25	18	19	23
Max Talhão (ha)			
VMI (m³.árvore⁻¹)	Bitrem	Tritrem	Hexatrem
0,15	39	42	51
0,20	38	41	49
0,25	36	38	45

Legenda: VMI: volume médio individual; Min Talhão: tamanho mínimo do talhão; Max Talhão: tamanho máximo do talhão.

Nos cenários estudados, os menores VMI apresentaram maiores tamanhos ideais de talhão, pois, nestes cenários ocorre uma tendência da DOE ser menor. Com isso, encontrou-se um maior espaçamento entre as estradas. Isso se explica pela necessidade de redução de custos fixos, em especial de estradas e perda de área produtiva, que é mais sensível em menores VMI.

O tipo de CVC também influenciou no tamanho ideal mínimo e máximo do talhão. Essa relação pode ser observada onde quanto maior o PBTC, maior a necessidade de ter talhões áreas maiores. Isso reflete em menos estradas para construir e manter, menor perda de área de plantio, porém, o custo da extração pode aumentar de forma proporcional ao aumento do talhão. Isso porque o equipamento de extração terá uma maior distância para percorrer dentro do talhão.

6. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que é possível obter a DOE em função do VMI e CVC e que essas variáveis influenciam no valor da densidade ótima de estradas. Percebe-se que as menores condições de VMI associadas aos CVCs de maior PBTC, apresentaram menores densidades ótimas de estradas. Com isso, infere-se que ter conhecimento da produtividade esperada da fazenda, pode garantir uma menor DOE e assim reduzir custos.

Foi possível entender o comportamento do solo do local, determinar o uso e ocupação da área, classificar as estradas e entender o comportamento da declividade, tanto na área de estudo, quanto das estradas do local. Com isso, encontrou-se os pontos críticos relacionados ao tipo de CVC, que permitem realizar o melhor planejamento de retirada de madeira da área. Os CVCs de maior PBTC, hexatrem, possuem maior percentual de trechos com riscos operacionais, porém, conseguem transporte cerca de 83% de toda a madeira presente na área.

Por meio da metodologia proposta, foi possível encontrar a densidade ótima da área nos cenários avaliados e inferir que, o valor obtido nesse estudo, é menor do que encontrado atualmente no local.

O estudo possibilitou a determinação de tamanho máximo e mínimo de talhões e a capacidade de estocagem de madeira nas vias, que também sofrem influência das várias VMI e CVC. Onde observa-se que, em cenários com menores VMI, os talhões tendem a ser maiores. Já a variável CVC, apresenta uma relação proporcional, ou seja, onde a CVC apresenta maior PBTC, os talhões também têm a tendência de apresentarem maiores dimensões de áreas.

7. REFERÊNCIAS

- AKAY, A. E.; WING, M. G.; SIVRIKAYA, F.; SAKAR, D. A GIS-based decision support system for determining the shortest and safest route to forest fires: a case study in Mediterranean Region of Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n 1, p. 1391-1407, 2012.
- ÁLVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 6, n. 22, p. 711-728. 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ALVES, R. T.; FIEDLER, N. C.; SILVA, E. N. D.; LOPES, E. D. S.; CARMO, F. C. A. Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 5, p. 897-904. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000500012>.
- AMÉRICO, C. **Microplanejamento de estradas florestais por meio de geotecnologias**. 2018. 48 f. Dissertação (Mestrado em "Planejamento e uso de recursos renováveis") – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2018.
- ARAÚJO, L. C. **Modelagem da produtividade e da velocidade do forwarder em áreas inclinadas**. 2019. 89f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, 2019.
- ARCE, J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando a minimização dos custos**. 1997. 111f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 1997.
- BACHA, C. J. C. A expansão da silvicultura no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**. Rio de Janeiro, v. 45, n. 1, p. 145-168, 1991.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modelling**, v.188, p.145–173, 2005.

BONAZZA, M. **Alternativas operacionais no desbaste e corte final em florestas de *Pinus taeda***. 2019. 147f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2019.

BRASIL. **Resolução nº 211 de 13 de novembro de 2006**. Requisitos necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC, a que se referem os arts. 97, 99 e 314 do Código de Trânsito Brasileiro - CTB. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes>. Acesso em: 05 nov. 2022.

BURLA, E. **Avaliação técnica e econômica do *harvester* na colheita e processamento de madeira em diferentes condições de declividade e produtividade florestal**. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

CARVALHO, R. P., DANIEL, O., DAVIDE, A. C.; SOUZA, F. R. Atributos físicos e químicos de um neossolo quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 148-159. 2015.

CARVALHO, R.M.M.A.; SOARES, T.S.; VALVERDE, S.R. Caracterização do setor florestal: uma abordagem comparativa com outros setores da economia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 105-118, 2005.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. **Nota Econômica Nº19: Indústria fica menos concentrada regionalmente**. 2021. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2021/6/nota-economica>. Acesso em: 10 jan. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Boletim Unificado - Outubro 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/boletins>. Acesso em: 05 nov. 2022.

CORRÊA, C. C. M., MALINOVSKI, J. R.; ROLOFF, G. Bases para planejamento de rede viária em reflorestamento no sul do Brasil. **Floresta**, v. 36, n. 2, p. 277-286. 2006. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v36i2.6450>.

CORRÊA, C. M. C. **Perdas de solo e a qualidade da água procedente de estrada de uso florestal no planalto catarinense**. 2005. 158f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO DISTRITO FEDERAL – DER/DF. **Manual de Normas, Procedimentos e Padronização das Atividades Executadas pelos Distritos Rodoviários**. 2ª Edição. 126p. Brasília, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Conservação Rodoviária**. 2ª Edição. 564p. Rio de Janeiro, 2005.

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, n. 1, p. 1-10. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.12.012>.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa. 2006. Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/>. Acesso em: 07 jan. 2022.

EPSTEIN, R., WEINTRAUB, A., SAPUNAR, P., NIETO, E., SESSIONS, J. B., SESSIONS, J., BUSTAMANTE, F.; MUSANTE, H. A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. **Operations Research**. v. 54, n. 6. p. 1017–1027. 2006. <https://doi.org/10.1287/opre.1060.0331>.

FARIA, F. N. **Aspectos técnicos e custos na determinação da densidade de estradas em plantios florestais**. 2020. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR. 2020.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DE MATO GROSSO DO SUL - FAMASUL. **Boletim Florestas Plantadas nº 26**. 2022. Disponível em: <https://portal.sistemafamasul.com.br/boletim-florestas-plantadas-n%C2%BA-26>. Acesso em: 15 nov. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report**. 186f. Rome. 2020. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Planning forest roads and harvesting systems**. 148p. Rome. 1974. <https://www.fao.org/3/d9853e/d9853e.pdf>

GHAFFARIAN M.R., STAMPFER, K., SESSIONS, J.: Comparison of three methods to determine optimal road spacing for forwarder-type logging operations. **Journal of Forest Science**, v. 55, p. 423–431, 2009.

GONÇALVES, L. E. S. **Eficiência do sistema de drenagem adotado na região de mineração de bauxita, na Zona da Mata de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.

HENNINGSSON, M., KARLSSON, J. AND RÖNNQVIST, M. Optimization models for forest road upgrade planning, **Journal of Mathematical Modelling and Algorithms**, v. 6, n.1, p. 3– 23. 2007.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual IBÁ 2021**. 2021. Disponível em: <https://iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em: 18 jan. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2020**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html>. Acesso em: 18 jan. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Inflação**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>. Acesso em: 10 nov. 2022.

INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN – ILOS. **Custos Logísticos no Brasil**. 2017. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/analise-de-mercado/relatorios-de-pesquisa/custos-logisticos-no-brasil/>. Acesso em: 05 nov. 2022.

INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN – ILOS. **Matriz de transportes**. 2020. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/tag/matriz-de-transportes/>. Acesso em: 05 nov. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA - INCRA. **Relatório de Análise de Mercado de Terras - Mato Grosso do Sul - Referência**

2019/2020. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/incra/pt-br/assuntos/governanca-fundiaria/relatorio-de-analise-de-mercados-de-terras/mato-grosso-do-sul>. Acesso em: 15 nov. 2022.

KELLER, G.; SHERAR, J. **Engenharia de estradas de baixo volume de tráfego: Manual de campo para as melhores práticas de gestão em estradas de baixo volume de tráfego.** EUA: Agência de Desenvolvimento Internacional dos EUA, 183 p. 2010.

LAGE, M. L. C., GAVA, R., MOREIRA, J. C. C.; LIMA, A. A. T. F. C. Análise das ações do polo de excelência em florestas para a inovação e sua contribuição para a o setor florestal em Minas Gerais. **Revista Gestão Inovação e Tecnologias.** v. 6, n. 2. 2016. 3155-3167. DOI:10.7198/S2237-0722201600020013.

LEGÜES, A. D., FERLAND, J. A., RIBEIRO, C. C., VERA, J. R., WEINTRAUB, A. A tabu search approach for solving a difficult forest harvesting machine location problem. **European Journal of Operational Research.** v. 179, n. 3, p. 788-805. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.071>.

LOPES, E. S.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P. Classificação e custos de estradas em florestas plantadas na região sudeste do Brasil. **Revista Árvore,** Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 329-338. 2002.

LOTFALIAN, M. Density of forest roads network for ground skidding in Middle forests of Iran North. **World Applied Sciences Journal,** Sari, v. 7, n. 9, P. 917-922. 2009.

MACHADO, C. C. **Sistema brasileiro de classificação de estradas florestais (SIBRACEF): Desenvolvimento e relação com o meio de transporte florestal rodoviário.** 1989. 213f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1989.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, S. R.; CASTRO, G. P.; O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal.** Viçosa: UFV, 2014. p. 15-45.

MACHADO, C.C. **Construção e Conservação de Estradas Rurais e Florestais.** 441p. Viçosa: Editora UFV. 2013.

MACHADO, C.C.; LOPES, E.S.; BIRRO, M.H. **Elementos básicos do Transporte Florestal Rodoviário**. 2.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009.167p.

MALINOVSKI, J. R.; CARVALHO, L. C.; CARVALHO, M. **Planejamento de rede viária**. Relatório Técnico Klabin. 2004.

MALINOVSKI, R. A. **Modelo matemático para otimização dos custos operacionais de transporte de toras com base na qualidade de estradas**. 2010. 180f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R. **Evolução dos sistemas de colheita de madeira para pinus na região Sul do Brasil**. Curitiba: UFPR/FUPEF, 108p. 1998.

MARCELINO, F. A.; FENNER, P. T.; SCHACK-KIRCHNER, H.; ESPERANCINI, M.; SIMÕES, D. Relação entre risco de erosão e distância de camalhões em estradas florestais. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, p. 61-73, 2012.

MATTHEWS, D. M. **Cost control in the logging industry**. McGraw-Hill, New York, 374p. 1942. <https://digital.library.cornell.edu/catalog/chla2936488>

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. <http://dx.doi.org/10.1007/s10732-015-9299-9>.

MORAES, A. C. de. **Classificação de estradas e determinação de rotas de transporte utilizando sistema de informação geográfica**. 2014. 66f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

MOREIRA, F. M. T.; SOUZA, A. P. DE; MACHADO, C. C.; MINETTI, L. J.; SILVA, K. R. Avaliação operacional e econômica do “Feller-Buncher” em dois subsistemas de colheita de florestas de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 199-205, 2004.

MOREIRA, J. M. M. A. P., SIMIONI, F. J.; OLIVEIRA, E. B. Importância e desempenho das florestas plantadas no contexto do agronegócio brasileiro. **Floresta**. v 1, n 47, p. 85-94. 2017. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v47i1.47687>.

MOREIRA, J.M.M.A.P.; OLIVEIRA, E.B. de. **Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/164206/1/Plantacoes-forestaisCapitulo-1.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2022.

OLIVEIRA FILHO, ARY. T., TAMEIRÃO NETO, E., CARVALHO, W. A. C., WERNECK, M., BRINA, A. E., VIDAL, C. V., REZENDE, S. C., PEREIRA, J. A. A. Análise florística do compartimento arbóreo de áreas de Floresta Atlântica sensu lato na região das bacias do leste (Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro). **Rodriguésia**. 2005, v. 56, n. 87, pp. 185-235. <https://doi.org/10.1590/2175-78602005568715>.

OLIVEIRA, D. **Aspectos técnicos e custos de sistemas de colheita de madeira em povoamentos de *Eucalyptus grandis* de baixo volume individual**. 2013. 116f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR. 2013.

OLIVEIRA, F. P.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; CURTI, N.; LEITE, F. P. Avaliação de perdas de solo em estradas florestais não pavimentadas no Vale do Rio Doce, Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p.331-339, 2010. <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/27656>.

PASA, D. L., XIMENDES, M. C., RECH, R. S., SANTOS, C. S., FARIAS, J. A. O setor florestal como base para o desenvolvimento socioeconômico regional: um estudo de caso em Encruzilhada do Sul, RS. **Revista Instituto Florestal**. v. 32 n. 1 p. 29-41. 2020.

PEREIRA NETO, S. D. **Análise econômica da densidade de estradas nas áreas de produção de *Eucalyptus***. 1995. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 1995.

REZAEI, M., SHAFIZADE F., REZAEI, M. A. Determination of correction coefficient of average skidding distance according to the existing road network in *Alikia Soltan* forest of Iran. **Journal of Forest Science**. v. 59, n. 12, p. 475-478, 2013.

RIBASKI, N. G. Conhecendo o setor florestal e perspectivas para o futuro. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 44-58. 2018. <https://brazilianjournals.com/index.php/BJAER/article/view/329>.

RIBEIRO, C. A. A. S.; MARCATTI, G. E.; MUNARETTI, A. M.; SILVA, K. E.; ALMEIDA, D. R. A.; VASCONCELOS, R. S.; NETO, E. L. V. **Otimização do traçado de trilhas para acesso a recursos florestais naturais**. Embrapa Amazônia Ocidental, ISSN 1517-3135, doc. 134, 99 p., 2017.

ROCHA, E. S., BARROS, P. L. C., MACIEL, M. N., ERLER, J. Avaliação da densidade ótima de estradas florestais em dois sistemas de exploração florestal no estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 47, p. 49-58, 2007.

RÖNNQVIST, M., SOPHIE 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 opens problems. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 11-40. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1907-4>.

SANTOS, A. C. G. R. **Modelos matemáticos de apoio ao corte e transporte de madeira em florestas**. 2021. 86f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada à Economia e à Gestão) - Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. 2021.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., ALMEIDA, J. A., ARAÚJO FILHO, J. C., OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed. revisado e ampliado. Brasília: Embrapa. 2018.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. **Manejo sustentado de florestas inequidêneas heterogêneas**. Santa Maria: Imprensa Universitária/UFSM, 195p. 2000.

SCOPEL, I., SOUSA, M. S.; MARTINS, A. P. Infiltração de água e potencial de uso de solos muito arenosos nos Cerrados (Savanas) do Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 33, n. 2, p. 203-219. 2013. <https://doi.org/10.5216/bgg.v33i2.25556>.

SEIXAS, F.; CASTRO, G. P. Extração. In: MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. 3.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2014. p.106-177.

SFEIR, T. A. **Planejamento integrado da colheita e do transporte florestal utilizando restrições de adjacência espacial**. 2020. 159f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2020.

SILVEIRA, C. T., FIORI, A. P., SCHILIPACK, P.; DIAS, S. M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da serra do mar paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, p. 03-22. 2014. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i1.366>.

SIMIONI, F. J., BINOTTO, E., HOFF, D. N. A inovação tecnológica na perspectiva dos gestores da Indústria madeireira da região de Lages, SC. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 981-987. 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000500020>.

SISTEMA FLORESTAL BRASILEIRO – SFB. **Mapa das florestas do Brasil**. 2020. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-e-recursos-florestais>. Acesso em: 26 jul. 2022.

SOARES, N. S. **Análise da competitividade e dos preços da celulose e da madeira de eucalipto no Brasil**. 2010. 205f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2010.

SOUZA D. O. **Algoritmos genéticos aplicados ao Planejamento do transporte principal de madeira**. 2004. 184f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 2004.

SOUZA, F. L.; SAMPIETRO, J. A.; DACOREGIO, H. M.; SOARES, P. R. C.; LOPES, E. S.; QUADROS, D. S. Densidade ótima e aceitável de estradas na colheita de pinus no sistema de toras curtas e árvores inteiras. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 118, p. 189 - 198, 2018.

SOUZA, F. M. L., PUPO, C. H., SEREGHETTI, G. C., SANSÍGOLO, C. A., FERREIRA, J. P., SILVA, R.B.; GARCIA, D. P. Características de crescimento, densidade básica e composição química da madeira de Eucalyptus spp. na região de Ribas do Rio Pardo-MS. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 11, n. 4, p. 350-359. 2017. <https://doi.org/10.18011/bioeng2017v11n4p350-359>.

SOUZA, F. N. **Densidade de estradas em povoamentos de Pinus taeda L. em regime de desbastes e corte raso**. 2016. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC. 2016.

SOUZA. C. M. G. **Densidade ótima de estradas para povoamentos de teca (*Tectona grandis L.f.*) no estado de Mato Grosso**. 2011. 55f. Dissertação (Mestrado

em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT. 2011.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Digital Elevation Data**. 2014. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 07 jan. 2022.

VALENÇA, A. C. de V. et al. Fatores determinantes da produtividade e dos custos na colheita florestal. **Revista Madeira**, Curitiba, n. 51, p. 46-49, 2000.

WANKE, P. F. **Logística e transporte de cargas no Brasil: produtividade e eficiência no século XXI**. São Paulo: Atlas, 2010.

WEEB, N. P.; HERRICK, J. E.; DUNIWAY, M. C. Ecological site-based assessments of wind and water erosion: informing accelerated soil erosion management in rangelands. **Ecological Applications**, v.24, n.6, p.1405-1420, 2014.

WEINTRAUB, A. Integer programming in forestry. **Annals of Operations Research**, v. 149, n. 1, p. 209-216. 2007. <https://doi.org/10.1007/s10479-006-0105-9>.

ZAGONEL, R. **Análise da densidade ótima de estradas de uso florestal em um relevo plano de áreas com produção de *Pinus taeda***. 2005. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 2005