UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

THIAGO MARTINS ROCHA

EFEITO DO COMPRIMENTO DE TORAS NA EFICIÊNCIA DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2025
THIAGO MARTINS ROCHA

EFEITO DO COMPRIMENTO DE TORAS NA EFICIÊNCIA DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.
Orientador: D. Sc. Nilton César Fiedler
Conselheiro: Me. William Masioli

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2025

THIAGO MARTINS ROCHA

EFEITO DO COMPRIMENTO DE TORAS NA EFICIÊNCIA DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Aprovado em 23 de julho de 2025

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler
Deptº Ciências Florestais
e da Madeira - CCA/UFES
SIAPE 1278958

Prof. DSc. Nilton César Fiedler
(Orientador)

MSc. William Masioli
(Examinador)

Engª. Amanda Magda Almeida Santos
(Examinadora)

Engª. Luciélia Lacerda da Silva
(Examinadora)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por ter me dado forças, saúde e sabedoria ao longo de toda a jornada acadêmica.

À minha família, em especial à minha mãe, Adriana Martins, ao meu pai, Walber Rocha, e à minha irmã, Roberta Rocha, pelo apoio constante, emocional e financeiro, durante todo o período da graduação.

Aos meus avós, Hilda Martins, Maria Dirce e Walter Rocha, por todo suporte emocional e financeiro para que eu pudesse concluir esta etapa da minha formação.

À minha companheira, Luísa Lugon, por todo incentivo, paciência e apoio, especialmente nos momentos mais desafiadores do curso e durante a elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

Ao meu orientador, Nilton Cesar Fiedler, por todo o apoio, incentivo e orientação ao longo de toda a graduação e na elaboração desse trabalho.

Aos meus amigos de faculdade, Beatriz Mauri, Caroline Carvalho, Eduardo Neiva, Gustavo Jaske e João Pedro Vieira, pelo companheirismo diário, tanto nas responsabilidades acadêmicas quanto nos momentos de descontração.

Aos meus amigos Filipe Altoé, Giuseppe Felipe, Gustavo Misse, João Pedro Veloso e Vitor Portinho, pelo apoio emocional e pela presença constante durante a graduação.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, e ao Núcleo de Pesquisa em Mecanização, Ergonomia, Colheita, Logística e Incêndios Florestais, pela formação de qualidade, pelas oportunidades de aprendizado e pelo suporte oferecido ao longo da realização desta pesquisa.

À banca examinadora deste estudo, Amanda Magda Almeida Santos, Luciélia Lacerda da Silva e William Masioli, pela atenção, sugestões construtivas e dedicação na leitura e avaliação deste trabalho.

Ao meu coordenador de equipe, Diego Piva Cezana, pela disposição em ajudar, por todos os conselhos e ensinamentos que foram muito úteis para a conclusão desse trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram com a elaboração deste trabalho, o meu sincero agradecimento. Sem o apoio de vocês, nada disso seria possível.

Obrigado!

RESUMO

O transporte rodoviário de madeira é considerado um pilar dentro do ciclo florestal, sendo a etapa responsável por escoar a madeira das áreas de plantio até os destinos de produção. Contudo, o transporte florestal também é considerado uma das partes mais onerosas dentro do processo florestal. Decisões estratégicas baseadas em dados estatísticos é uma das formas mais eficientes para reduzir custos e maximizar os processos. Dessa forma, o presente trabalho avaliou como o comprimento de toras pode influenciar a eficiência do transporte de madeira, analisando a influência sobre o volume transportado (m^3), o peso bruto total - PBT (Mg) dos veículos e a relação peso/volume – RPV (km/m^3) da madeira. Os dados trabalhados foram fornecidos pela empresa Veracel Celulose S.A, referentes a viagens realizando o transporte de toras de 6,8 e 7 metros. Os dados analisados foram extraídos do sistema da empresa, no período de 01 de fevereiro de 2025 a 31 de março de 2025, resultando em dados de 743 viagens transportando os dois comprimentos de toras. Posteriormente, foi feita uma restrição nos dados da variável RPV, a fim de garantir consistências estatísticas. Em seguida os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, para verificar a normalidade dos dados, e ao teste não paramétrico U de Mann-Whitney, para comparar as amostras independentes para dados não paramétricos. Os resultados indicaram que o transporte realizado com toras cortadas com 7 m de comprimento é mais eficiente, transportando, em média, 5% a mais de volume de madeira por viagem comparando ao transporte com toras de 6,8 m. Houve também um incremento médio de 3% no PBT dos veículos de transporte na operação com toras de 7 m, porém, sem exceder os limites de peso e dimensões permitidos por lei. Entre os testes, a RPV não apresentou alterações significativas. Assim, conclui-se que o transporte com toras cortadas com 7 m é mais eficiente, por apresentar um ganho em volume por viagem sem exceder o limite máximo de peso permitido. A variável RPV, por não ter apresentado diferenças relevantes entre os tratamentos, não influenciou nos resultados observados no estudo.

Palavras-chave: Volume de madeira; Peso bruto total; Relação peso/volume; Eucalipto.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 9
2. OBJETIVOS 11
2.1 Objetivo Geral 11
2.2 Objetivos específicos 11
3. REVISÃO DE LITERATURA 12
3.1 O Setor florestal e a produção de celulose no Brasil 12
3.2 Transporte de madeira 13
3.2.1 Etapas do transporte rodoviário de madeira 14
3.2.1.1 Carregamento de madeira 14
3.2.1.2 Transporte efetivo 15
3.2.1.3 Descarregamento de madeira 17
3.2.2 Legislação brasileira regulamentadora para circulação de veículos pesados 18
3.2.2.1 Código de Trânsito Brasileiro (CTB) 18
3.2.2.2 Resoluções do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) 18
3.3 Colheita florestal mecanizada 21
3.4 Método de aferição de volume por deslocamento de água 22
4 MATERIAL E MÉTODOS 23
4.1 Caracterização da área e do objeto de estudo 23
4.2 Sistema de colheita de madeira 24
4.3 Caracterização do transporte rodoviário de madeira 25
4.4 Base de dados e controles 28
4.5 Análise de dados 29
4.5.1 Intensidade Amostral 29
4.5.2 Análises estatísticas 30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 31
5.1 Avaliação da suficiência amostral 31
5.2 Influência do comprimento de tora sobre o volume transportado por viagem 31
5.3 Influência do comprimento de tora no peso bruto total dos veículos 33

5.4 Influência do comprimento de toras na relação peso/volume (RPV) da madeira 35
6 CONCLUSÃO 38
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 39

LISTA DE FIGURAS

Figura 2 - Bi-minhão ou “romeu e julieta”. 16
Figura 3 - Cavalo mecânico e semirreboque. 16
Figura 4 - Cavalo mecânico e dois semirreboques acoplados. 17
Figura 5 - Cavalo mecânico e três semirreboques acoplados. 17
Figura 6 - Localização das áreas operacionais 23
Figura 7 - Esquema ilustrativo da operação do Harvester. 25
Figura 8 - Influência do comprimento de tora no volume transportado por viagem ... 32
Figura 9 - Influência do comprimento de tora no PBT dos veículos. 34
Figura 10 - Influência do comprimento de toras na Relação Peso Volume (RPV) de cargas do transporte rodoviário de madeira. 36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Representação da distribuição de peso por eixo e PBT de acordo com o tipo de combinação veicular. 20
Tabela 2 - Imagem, marca, modelo e especificações técnicas do harvester. 24
Tabela 3 - Imagem, marca, modelo e especificações técnicas do forwarder. 25
Tabela 4 - Imagem, marca, modelo e especificações técnicas da grua de carregamento. 26
Tabela 5 - Imagem, marca, modelo e especificações técnicas dos equipamentos de transporte. 27
Tabela 6 - Imagem, marca, modelo e especificações técnicas da máquina de descarregamento. 28
Tabela 7 - Variáveis analisadas, tratamentos e número de repetições. 30
Tabela 8 - Suficiência amostral para análise da influência do comprimento de toras no transporte rodoviário de madeira. 31

1. INTRODUÇÃO

As empresas florestais buscam cada vez mais por resultados relevantes e satisfatórios, impulsionadas pela crescente demanda por produtos de origem florestal. A potencialização da eficiência e produtividade das operações pode ser uma alternativa para alcançar resultados cada vez mais satisfatórios (MASIOLI *et al*., 2024).

No entanto, a eficiência é um conceito mais abstrato e difícil de mensurar, por isso estudos recentes têm se apoiado em indicadores técnicos e econômicos para representa-la, entre os quais se destacam o volume transportado por viagem, o peso bruto total (PBT) dos veículos e a relação peso/volume (RPV) da madeira (MOSKALIK *et al*., 2022; LEONELLO *et al*., 2024). Esses indicadores permitem avaliar o aproveitamento da capacidade dos veículos, bem como o equilíbrio entre massa e volume de carga, sendo possível constituir parâmetros mensuráveis da eficácia do transporte rodoviário de madeira.

O transporte rodoviário de madeira desempenha papel central no setor florestal brasileiro, sendo reconhecido como uma das operações de maior custo em todo o processo produtivo. Rodrigues (2007) apud Lopes *et al*., (2016) destaca que essa atividade pode representar até 60% dos custos logísticos da madeira, influenciada principalmente pelo alto custo de combustível e manutenção da frota.

Nesse sentido, a maximização da eficiência do carregamento e disposição da carga, somada com a escolha adequada da composição veicular, permitem reduzir significativamente o custo por metro cúbico transportado (LOPES *et al*., 2016). Além disso, fatores como a distância de transporte, capacidade de carga dos veículos, velocidade média e consumo de combustível exercem influência direta no custo do frete (VIRGENS *et al*., 2020).

Entre os indicadores citados, o volume transportado por viagem é determinante para a eficiência, principalmente por relacionar diretamente a quantidade de madeira entregue com a utilização da capacidade volumétrica dos veículos. Estudos apontam que veículos com um melhor aproveitamento volumétrico tendem a reduzir o número de viagens necessárias, consequentemente, reduzindo custos e emissões (BELISARIO *et al.,* 2022; MOSKALIK *et al*., 2022).

O peso bruto total (PBT) representa a soma da tara do veículo com a carga transportada, sendo diretamente limitado pela legislação de trânsito. Ultrapassar os

parâmetros legais de limite de peso resulta não apenas em penalidades e implicações legais, mas também oferecem riscos à segurança e durabilidade da frota de transporte (BRASIL, 2021).

A relação peso/volume (RPV) da madeira garante consistências na comparação entre diferentes carregamentos, já que variações na densidade ou no teor de umidade da madeira podem interferir e distorcer os resultados de eficiência volumétrica, tornando fundamental o controle dessa variável para garantir confiabilidade nos estudos (KOZAKIEWICZ *et al*., 2021; LEONELLO *et al*., 2024).

O comprimento das toras é uma variável que influencia diretamente esses indicadores, por afetar o tanto e a forma de acomodação da carga quanto a proporção entre volume e peso transportado efetivamente. Toras mais longas podem permitir maior aproveitamento da capacidade volumétrica dos veículos, mas devem ser analisadas com cautela para não ultrapassar os limites legais de PBT, bem como os limites das dimensões máximas permitidas pelo Código de Trânsito Brasileiro (CTB) (BRASIL, 2021).

Estudos mostram que alterações no comprimento de toras influenciam na eficiência do transporte, ao modificar a densidade das pilhas e, consequentemente, os indicadores de volume e peso (BELISARIO et al., 2022). Nesse sentido, investigar os efeitos do comprimento de toras no transporte rodoviário de madeira torna-se uma alternativa essencial para orientar decisões visando maior eficiência técnica, econômica e ambiental.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente estudo teve como objetivo verificar a influência do comprimento de toras na eficiência do transporte rodoviário de madeira.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a influência do comprimento de toras no volume transportado por viagem no transporte rodoviário de madeira;
- Analisar a influência do comprimento de toras no peso bruto total (PBT) dos veículos do transporte de madeira;
- Analisar a influência do comprimento de toras na Relação Peso/Volume no transporte rodoviário de madeira.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O Setor florestal e a produção de celulose no Brasil

O setor florestal começou a ter seu desenvolvimento moderno no Brasil a partir da década de 1960 com a promulgação da Lei de Incentivos Fiscais ao Reflorestamento. Essa legislação, de número 5.106, entrou em vigor no país em setembro de 1966, o que estimulou a expansão das florestas plantadas no país (KENGEN, 2019).

Ao longo dos anos, o Brasil foi se tornando cada vez mais representativo nesse setor, principalmente com a expansão da produção de celulose no país. Atualmente o valor da produção florestal atingiu o recorde de R$ 37,9 bilhões em 2023, tendo um crescimento de 11,2% maior se comparado com o ano anterior, e uma área de florestas plantadas superior a 9,7 milhões de hectares (IBGE, 2024).

Segundo o relatório de sustentabilidade do IBA (2024), existem em torno de 7,8 milhões de hectares de florestas plantadas no Brasil, distribuídos nas cinco regiões do país. A região sudeste possui 44% desse total, seguida das regiões centro este, com 20%, sul com 18%, nordeste com 13% e a região norte com menor parcela, 5%.

Mais especificamente na região do sul do estado da Bahia, ao decorrer dos últimos 35 anos, e com a expansão do setor de celulose, houve um aumento representativo no cultivo de eucalipto. No estudo realizado por Moreau *et al* (2021), em que os autores realizaram análises referentes ao uso da terra na região do extremo sul da Bahia, foi evidenciado um aumento de mais de 300 mil hectares de área plantada com eucalipto na região nesse período.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade divulgado pela Veracel (2025), empresa de celulose localizada no município de Eunápolis - BA, a companhia produziu, em 2024, aproximadamente 4,3% da celulose produzida no país. Demonstrando como o setor de celulose e papel é representativo na região do sul da Bahia.

A cadeia produtiva da celulose vem ganhando cada vez mais destaque no Brasil, se tornando hoje uma das mais relevantes do setor florestal no país. Em 2019, o produto foi responsável por movimentar cerca de US$ 7,5 bilhões em exportações. Nesse cenário o Brasil vem se destacando e se tornou o maior exportador global do insumo, bem como o segundo maior produtor de celulose do mundo, com uma

produção anual de 19,7 milhões de toneladas, ficando atrás apenas dos Estados Unidos da América (FRANCO; BARREIRA, 2021).

As condições edafoclimáticas do Brasil e o avanço tecnológico no manejo e tratos silviculturais favorecem a posição de destaque mundial no setor florestal no país, principalmente se considerarmos o volume de madeira produzido por área por ano, em um dos menores ciclos de plantio e colheita comparado a outros países. Em 2023, a produtividade média foi de 33,7 m³/ha/ano nos plantios de eucalipto no Brasil, onde o estado com a menor produtividade registrou 20 m³/ha/ano, e o estado com a maior produtividade registrou 41,1 m³/ha/ano (IBÁ, 2024).

3.2 Transporte de madeira

O transporte de madeira corresponde ao conjunto de operações logísticas responsáveis pelo deslocamento da matéria-prima do local de extração florestal até os pontos de beneficiamento, ocorrendo em três principais etapas: carregamento, transporte efetivo e descarregamento (MENSAH., *et al* 2025).

Historicamente, a operação de transporte de madeira evoluiu de práticas de baixo rendimento, como a atividade manual ou com o uso de tração animal, para a mecanização e motorização, principalmente a partir do século XX (ACUNA, 2017).

No Brasil os modais mais utilizados no transporte de madeira são o rodoviário, ferroviário e hidroviário, com o modal rodoviário sendo o mais utilizado, principalmente pela facilidade de adaptação às condições operacionais florestais e pela flexibilidade de alteração de rotas (LEONELLO., *et al* 2024). Os sistemas ferroviário e hidroviário são utilizados em menores escalas, principalmente por dependerem de investimentos altos para implantação, como a construção de ferrovias ou terminais marítimos (FERIGATO; SILVA, 2021).

A operação de transporte de madeira com o modal rodoviário pode sofrer grande influência pelo tipo de veículo empregado, distância dos trajetos campo/indústria e da disponibilidade da rede viária florestal. O período de espera nas atividades de carregamento/descarregamento e o tipo dos equipamentos utilizados nestas atividades, também são fatores de grande influência na operação (GUIMARÃES *et al.,* 2016).

Rodrigues (2007 apud LOPES *et al*., 2016) evidenciaram que o transporte de madeira pode corresponder até 60% dos custos logísticos no ciclo de produção florestal, principalmente quando realizado por caminhões articulados e em rotas

rodoviárias de longas distâncias. Essa grande representação nos custos logísticos se deve principalmente pelo preço do combustível, número de colaboradores e máquinas necessários para realizar a operação, e rusticidade de todo o processo.

A falta de estrutura viária, aproximadamente 12% das estradas florestais são pavimentadas juntamente com impactos climáticos, como chuvas intensas, que podem causar atoleiros e alagamentos, são os maiores desafios na operação de logística de transporte florestal (GUIMARÃES *et al.,* 2016).

No transporte rodoviário de madeira, o comprimento de tora pode influenciar diretamente na eficiência dos veículos. Diante desse fator, deve-se fazer um planejamento do comprimento de toras a ser utilizado, em operações de longa distância a utilização de veículos com maior capacidade de carga pode resultar em um ganho representativo em volume entregue (RODRIGUES, 2007 apud LOPES *et al.*, 2016).

O tipo de implementos e veículo utilizados também são determinantes para o melhor aproveitamento da capacidade de carga no transporte de madeira. Em um estudo conduzido por Belisario *et al.* (2022), os autores concluíram que os veículos com maiores áreas de carga apresentaram maior produtividade.

3.2.1 Etapas do transporte rodoviário de madeira

3.2.1.1 Carregamento de madeira

O carregamento de madeira representa a operação em que as toras são deslocadas das pilhas de madeira e colocadas nos veículos de transporte. Nesse sentido, essa operação se torna o meio de ligação entre a extração e o transporte efetivo, podendo ser realizada de forma manual ou mecanizada. O formato mecanizado é o mais adotado pelas empresas, principalmente pela eficiência operacional e segurança (MINETTE, 2002 apud DINIZ *et al.,* 2018).

Assim como também evidenciaram Diniz *et al.* (2018), as máquinas mais utilizadas na operação de carregamento florestal são os carregadores florestais ou gruas florestais. Esses equipamentos costumam ser compostos por escavadeiras hidráulicas equipadas com uma garra de carregamento na ponta da lança. A função desse equipamento se resume em realizar a movimentação das toras da pilha de madeira nas margens das estradas ou pátios para os veículos de transporte.

3.2.1.2 Transporte efetivo

Segundo Lachini *et al.* (2018), o transporte efetivo da madeira refere-se a etapa em que a madeira é retirada do ponto de origem e transportada até a indústria ou local de processamento. Os veículos mais empregados no transporte rodoviário de madeira serão detalhados abaixo:

(a) Caminhão: Caminhões simples ou autocarregáveis (Figura 1) utilizados em operações onde a circulação de veículos maiores não é possível, ou seja, um trajeto de menor distância.

Figura 1 - Caminhão simples e autocarregável de madeira, respectivamente.
Fonte: Manos Implementos (2023); Cidade Marketing (2025).

(b) Bi-minhão ou “romeu e julieta”: Consiste em um caminhão simples ou autocarregável e um reboque florestal acoplados entre si (Figura 2). Assim como os caminhões, muito utilizados em operações de menor distância ou mais complexas para a circulação de veículos mais longos.

Figura 1 - Bi-minhão ou “romeu e julieta”.
Fonte: Facchini (2024).

(c) Carreta: Composta por um cavalo mecânico e um semirreboque acoplados entre si (Figura 3), podendo variar o número de eixos e disposição de acordo com a necessidade da operação.

Figura 2 - Cavalo mecânico e semirreboque.
Fonte: Facchini (2024); Grupo RF Caminhões (2025).

(d) Bitrem: Uma das combinações mais utilizadas no transporte de madeira, composto por um cavalo mecânico e dois semirreboques acoplados entre si (Figura 4), comumente são combinações veiculares que apresentam 7 eixos, podendo variar até 10 eixos.

Figura 3 - Cavalo mecânico e dois semirreboques acoplados.
Fonte: Facchini (2024); Grupo RF Caminhões (2025).

(e) Tritrem: Composto por um cavalo mecânico e três semirreboques acoplados entre si (Figura 5), comumente possuem 9 eixos em sua combinação veicular.

Figura 4 - Cavalo mecânico e três semirreboques acoplados.
Fonte: Facchini (2024); Grupo RF Caminhões (2025).

3.2.1.3 Descarregamento de madeira

Esta etapa se refere à operação de descarregamento da madeira vinda dos veículos de transporte no destino. Assim como no carregamento, exige a utilização de máquinas específicas para realizar essa operação. Os principais equipamentos empregados na operação de descarregamento de madeira são os guindastes florestais ou gruas florestais e empilhadeiras com uma grande capacidade de carga. Geralmente esses equipamentos operam utilizando uma garra de carga de madeira acoplada na ponta da lança (MACHADO *et al*., 2019).

Em um estudo conduzido por Arcego *et al* (2019) foi avaliado a influência no comprimento de toras na operação de carregamento e descarregamento de madeira. Neste estudo, os autores demonstraram que o comprimento de toras pode influenciar de forma direta no tempo da operação de descarregamento de madeira. Ao manipular toras maiores aumenta-se a eficiência da máquina em volume, porém, operações com toras mais longas pode resultar em um aumento do tempo de descarga, uma vez que esse material requer mais cautela e tecnicidade na operação.

3.2.2 Legislação brasileira regulamentadora para circulação de veículos pesados

O transporte florestal no Brasil está submetido a um arcabouço jurídico, que possui o objetivo de regulamentar e garantir a segurança viária, a conservação da infraestrutura das estradas e a sustentabilidade ambiental. A circulação de veículos pesados, principais modelos utilizados no transporte de madeira, são geridos por legislações federais, resoluções normativas e normas ambientais.

3.2.2.1 Código de Trânsito Brasileiro (CTB)

O Código de Trânsito Brasileiro (CTB), criado pela Lei nº 9.503/1997, define as regras gerais para a circulação e conduta no trânsito. Ele é o principal documento jurídico que regula o tráfego de veículos pesados no país. Os dispositivos abaixo se destacam quando se diz respeito ao transporte de carga (BRASIL, 1997).

(a) Art. 99: Veta a circulação de veículos que não atendam as especificações de dimensões e pesos estabelecidas pelo CONTRAN.

(b) Art. 101: Determina que os veículos que excedam as especificações estabelecidas pelo CONTRAN poderão circular perante uma Autorização Especial de Transporte (AET).

Dessa forma, o CTB se torna a base para a regulamentação de veículos de grande porte no país (BRASIL, 1997).

3.2.2.2 Resoluções do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN)

O CONTRAN desempenha um papel normativo complementar ao CTB, sendo responsável por editar e criar aspecto técnicos para a circulação de veículos pesados e ao transporte de cargas específicas, como a cana-de-açúcar e a madeira (BRASIL, 2021a).

I. Resolução CONTRAN nº 882/2021

Esta resolução regulamenta os limites de dimensão e peso dos veículos de transporte de carga e passageiros, incluindo combinações veiculares utilizadas no transporte de madeira. Essa resolução também atualizou o atual limite de tolerância em casos de excesso de peso por eixo dos caminhões e ônibus. Antes o limite de tolerância de excesso de peso era de 10%, passando agora para 12,5%, ou seja, caso

ocorra excesso de peso por eixo inferior a 12,5% do limite máximo estabelecido, não se aplica nenhuma penalidade (BRASIL, 2021).

(a) O comprimento máximo permitido é de até 30 metros, para Combinações de Veículos de Carga (CVC);

(b) A altura máxima permitida é de 4,40 metros;

(c) A largura máxima permitida é de 2,60 metros;

(d) O Peso Bruto Total (PBT) ou Peso Bruto Total Combinado (PBTC) máximo permitido é de 74 toneladas, a depender da configuração veicular e distribuição de peso por eixo;

(e) O peso máximo permitido por eixo simples com dois rodados é de 6 toneladas;

(f) O peso máximo permitido por eixo simples com quatro rodados é de 10 toneladas;

(g) O peso máximo permitido por eixo duplo (tipo tandem) com oito rodados é de 17 toneladas;

(h) O peso máximo permitido por eixo triplo (tipo tandem) com doze rodados é de 25,5 toneladas.

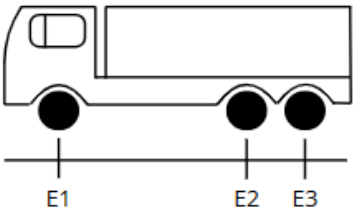
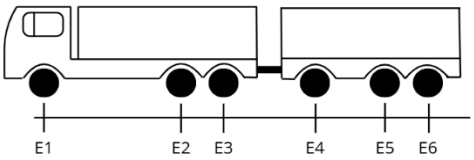
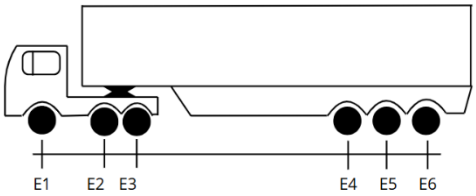
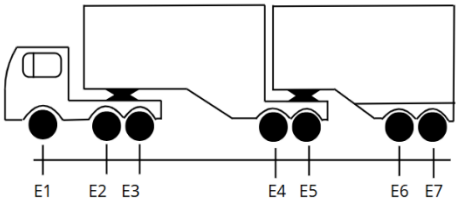
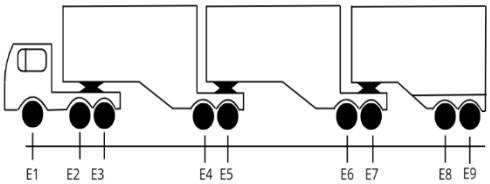
(i) Caso o peso exceda em até 5% o limite de peso bruto total estabelecido para o veículo, nenhuma penalidade é aplicada.

Para qualquer veículo que exceda os limites de dimensões e peso estabelecidos pela resolução nº 882/21 se torna necessário o uso da AET (BRASIL, 2021).

Por existirem limitações de peso estabelecidas pela legislação, é muito importante nas operações de transporte de madeira, o controle do peso que os veículos estão transportando. O aumento no comprimento de toras, por exemplo, pode resultar em um aumento no volume transportado por viagem, mas também vai influenciar diretamente no peso bruto total (PBT) dos veículos, exigindo um controle no momento do carregamento para que esse limite não seja ultrapassado (ARCEGO

et al., 2019). A Tabela 1 representa a distribuição de peso por eixo e peso bruto total permitido para as combinações veiculares mais utilizadas no transporte de madeira.

Tabela 1 - Representação da distribuição de peso por eixo e PBT de acordo com o tipo de combinação veicular.

Tipo de Veículo	Representação da Distribuição dos Eixos	Peso por Eixo e PBT
Caminhão simples trucado		(E1) E. Simples - 6 t (E2 E3) Conj. E. Tandem Duplo -17 t PBT = 23 t
Biminhão/Romeu e Julieta: caminhão trucado + reboque		(E1) E. Simples - 6 t (E2 E3) Conj. E. Tandem Duplo - 17 t (E4) E. Duplo - 10 t (E4 E5) Conj. E. Tandem Duplo - 17 t PBT = 50 t
Carreta: cavalo mecânico trucado + semirreboque		(E1) E. Simples - 6 t (E2 E3) Conj. E. Tandem Duplo - 17 t (E4) E. Duplo - 8,5 t (E5) E. Duplo - 8,5 t (E6) E. Duplo - 8,5 t PBT = 48,5 t
Bitrem: cavalo mecânico trucado + 2 semirreboques		(E1) E. Simples - 6 t (E2 E3) Conj. E. Tandem Duplo - 17 t (E4 E5) Conj. E. Tandem Duplo - 17 t (E6 E7) Conj. E. Tandem Duplo - 17 t PBT = 57 t
Tritrem: cavalo mecânico trucado + 3 Semirreboques		(E1) E. Simples - 6 t (E2 E3) Conj. E. Tandem Duplo - 17 t (E4 E5) Conj. E. Tandem Duplo - 17 t (E6 E7) Conj. E. Tandem Duplo - 17 t (E8 E9) Conj. E. Tandem Duplo - 17 t PBT = 74 t

Fonte: Adaptado de Brasil (2021).

II. Resolução CONTRAN nº 885/2021

Resolução que regulamenta o processo de aquisição da Autorização Especial de Transporte (AET). Essa autorização se torna necessária para combinações ou veículos que excedem os limites padronizados de limite dimensional e de peso pré-estabelecidos pelo CONTRAN. Essa resolução também estabelece as condições técnicas necessárias para a concessão da AET (BRASIL, 2021b).

Essa Autorização Especial de Transporte é fundamental para garantir a segurança viária, principalmente para cargas indivisíveis ou com uma configuração específica (BRASIL, 2021b).

III. Resolução CONTRAN nº 907/2022

Esta resolução regulamenta as obrigatoriedades e especificações técnicas para a amarração e contenção de cargas. As especificações para a amarração de carga no transporte de madeira encontram-se abaixo (BRASIL, 2022).

(a) É obrigatório a utilização de sistemas de fixação adequados, como cabos de aço, correntes ou cintas tensionadas;
(b) É necessário a realização de inspeções regulares para garantir a integridade e estabilidade da madeira.

3.3 Colheita florestal mecanizada

A colheita florestal mecanizada é um conjunto de operações que envolvem o corte, extração e processamento da madeira em florestas plantadas ou nativas com o uso de equipamentos para auxiliar nas operações. Apesar de também corresponder a operações em menor escala, o modelo de colheita florestal 100% mecanizado geralmente é utilizado em operações de maior escala. Essa operação caracteriza a última etapa no ciclo de produção florestal (AUGUSTYNCZIK *et al.,* 2015).

Existem três sistemas principais de colheita florestal mecanizada e são eles, o sistema de árvores inteiras, conhecido como *full-tree*, o sistema de toras curtas ou *cut-to-lenght*, e o sistema de toras longas ou *tree length* (SILVA, 2024).

(a) **Sistema de árvores inteiras ou *Full-tree*:** Neste formato a árvore é derrubada e posteriormente arrastada inteira até a beira da estrada ou ponto de coleta para ser processada ou transportada.

(b) **Sistema de toras curtas ou *cut-to-lenght*:** Sistema muito utilizado pelo setor de celulose, onde a árvore é cortada, processada e seccionada no

mesmo local de corte, e posteriormente baldeada para beira da estrada ou ponto de coleta.

(c) **Sistema de toras longas ou Tree Lenght:** Consiste em um sistema muito utilizado pelas serrarias, onde a árvore também é cortada, processada e seccionada no local de corte, porém com um comprimento de toras superior a 6 metros.

Segundo resultados apresentados por Arcego *et al*. (2019), o comprimento de toras influencia diretamente na eficiência do transporte da madeira, evidenciando que a escolha do método de colheita adequado, do comprimento das toras e da combinação veicular é determinante para a otimização do transporte.

3.4 Método de aferição de volume por deslocamento de água

O método utilizado pela Veracel Celulose para aferir o volume de madeira que chega à fábrica é o método por deslocamento de água, baseado no princípio de Arquimedes para determinar o volume sólido de madeira, individualmente ou em pilhas (MICHALAK *et al*., 2022). Neste sistema, a madeira inicialmente é pesada, posteriormente é submersa na água e pesada nesse momento novamente. Com essas diferentes informações de peso, os valores são aplicados em uma equação em que, a diferença do peso no ar e o peso submerso é o mesmo peso da água deslocada, permitindo calcular o volume do objeto:

$$V = \frac{m_{ar} - m_{água}}{p_{água}} \qquad (1)$$

Em que: **V** é o volume da madeira (m³); $\boldsymbol{m_{ar}}$ é o peso da madeira fora d'água (kg); $\boldsymbol{m_{água}}$ é o peso da madeira na água (kg); e $\boldsymbol{p_{água}}$ é a densidade da água (kg/m³).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área e do objeto de estudo

O estudo foi conduzido analisando dados de uma empresa produtora de celulose localizada na cidade de Eunápolis, na região sul do estado da Bahia. Os dados são referentes a viagens feitas transportando madeira de uma floresta de eucalipto adquirida pela empresa na região do Vale do Jequitinhonha, em Minas Novas - Minas Gerais (Figura 6).

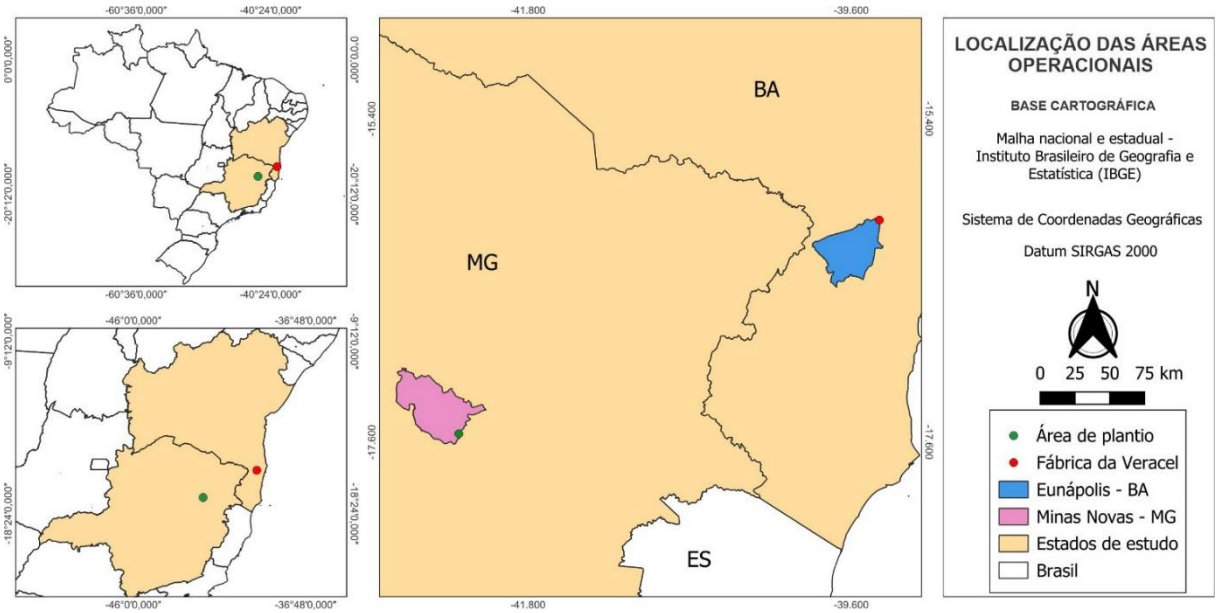


Figura 5 - Localização das áreas operacionais
Fonte: O autor.

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Relevo (SBCR) do IBGE (2006), a região do Vale do Jequitinhonha, Minas Novas, está localizada no domínio do Planalto Atlântico. Esse domínio é caracterizado principalmente por um relevo de mares de morros, com altitude variando entre 500 e 1500 metros.

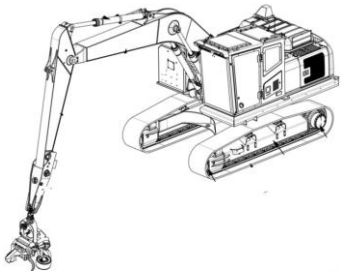
Köppen e Geiger classificam o clima na região como Aw, temperado. A temperatura média no mês mais quente, abril, é de 26°C, enquanto no mês de julho, o mais frio do ano, é de 17°C. A precipitação média anual é superior a 950 mm, com chuvas concentradas no verão (LACERDA *et al*., 2020).

A floresta transportada após colhida foi plantada há 8 anos, com clones de *Eucalyptus* sp. com uma densidade populacional de 1.112 árvores por hectare. No inventário pré-corte foi observado um DAP médio de 16 cm, um volume médio individual de 0,26 m³ e uma altura média das árvores de 26 metros.

4.2 Sistema de colheita de madeira

O sistema de colheita adotado pela empresa é denominado sistema de toras curtas ou *cut-to-lenght,* onde as operações de derrubada, processamento (descascamento, desgalhamento, destopamento) e criação dos feixes em campo foram realizadas pelo colhedor florestal, chamado *harvester* (Tabela 2). A madeira destinada para a fábrica deve ser descascada nesta etapa, uma vez que para a sua finalidade, a casca não é necessária.

Tabela 2 - Imagem, marca, modelo e especificações técnicas do *harvester*.

Imagem	Marca e Modelo	Especificações Técnicas
	Komatsu PC200F – 8MO	Rodado tipo esteiras, com potência do motor de 148 HP, força de tração de 180 kN, peso operacional de 23,2 Mg, altura máxima de trabalho e alcance máximo de 9,2 metros

Fonte: Adaptado de Komatsu Forest, 2021.

Na etapa de derrubada das árvores, o *harvester* é posicionado para que seja possível cortar até três linhas sem a necessidade de movimentação lateral da máquina. Dessa forma, o equipamento inicia a operação em linha reta, começando pela segunda das três linhas de corte. A etapa de processamento da madeira ocorre no local onde a árvore foi derrubada, assim evitando sujar as pilhas com resíduos (galhos e folhas). A Figura 7 representa um esquema representativo da operação do *harvester.*

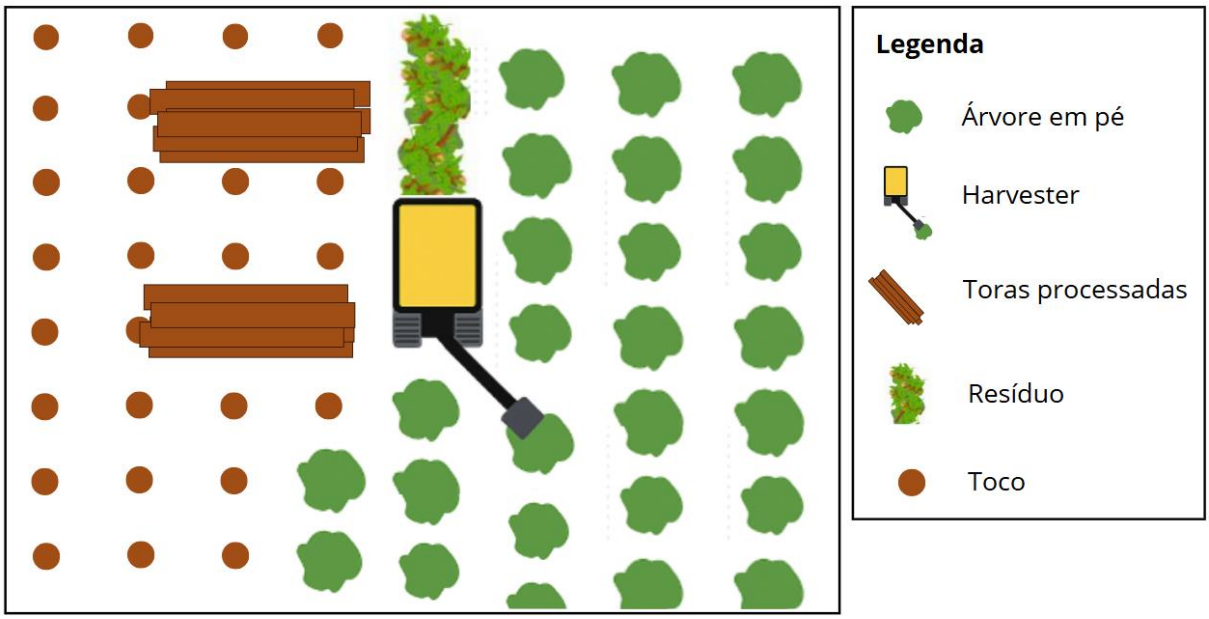


Figura 6 - Esquema ilustrativo da operação do *Harvester*.
Fonte: O autor.

A extração da madeira foi feita na forma de baldeio até a margem das estradas pelo trator autocarregável florestal, denominado *forwarder* (Tabela 3). Este equipamento também é responsável pela criação das pilhas de estoque em campo.

Tabela 3 - Imagem, marca, modelo e especificações técnicas do *forwarder*.

Imagem	Marca e Modelo	Especificações Técnicas
	Komatsu 825TX	Rodado de 8 pneus, com potência do motor de 128 HP, força de tração de 160 kN, carga bruta de 16 Mg, altura máxima de trabalho e alcance máximo de 7,5 metros.

Fonte: Adaptado de Komatsu Forest, 2021.

4.3 Caracterização do transporte rodoviário de madeira

O transporte rodoviário de madeira ocorre em três etapas principais: carregamento, transporte efetivo e descarregamento. O carregamento ocorreu durante 24 horas por dia durante todos os dias, em turnos de operadores e líderes de campo que alternavam a cada 12 horas.

A operação de carregamento foi realizada pela mesma máquina, constituída por uma escavadeira de esteiras CAT 320D, compondo a máquina base, equipada com uma garra de carregamento de madeira acoplada na ponta da lança (Tabela 4).

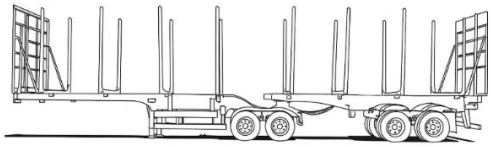
Tabela 4 - Imagem, marca, modelo e especificações técnicas da grua de carregamento.

Imagem	Marca e Modelo	Especificações Técnicas
	CAT 320D	Rodado de esteiras, com potência do motor de 130 HP, força de tração de 181 kN, capacidade operacional de 21,3 Mg, altura máxima de trabalho e alcance máximo de 7 metros.

Fonte: Adaptado de CAT, 2020.

A operação de transporte efetivo também ocorria durante 24 horas por dia, porém os motoristas trabalhavam na modalidade embarcado, onde eles dormiam em rota. Os veículos de trabalho eram bitrens florestais, constituídos por cavalos mecânicos FMX MAX 540, da marca Volvo, acoplados a implementos florestais da marca Facchini. Os equipamentos e suas principais especificações técnicas estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 - Imagem, marca, modelo e especificações técnicas dos equipamentos de transporte.

Imagem	Equipamento, marca e modelo	Especificações técnicas
	Cavalo mecânico Volvo FMX MAX 540	Possui 540 HP de potência, 260 kgfm de toque, peso total de 10 Mg, câmbio automatizado Overdrive de 13 marchas e 6 rés e PBT técnico de 42 Mg.
	Bitrem florestal Facchini	Possui 2 eixos tipo tandem em cada implemento, comprimento total de 16 m, comprimento individual útil de 7,5 m, altura total de 4,4 m, altura útil de 2,6 m, largura de 2,4 m, peso de 10 Mg, capacidade de 57 MG acoplado a um cavalo de 3 eixos

Fonte: Adaptado de Volvo Trucks Brasil (2025).

A madeira transportada foi escoada pela mesma rota, com uma distância média de transporte (DMT) de 634,4 km. As viagens foram efetuadas com um PBT inferior a 59,85 toneladas, referente ao peso máximo permitido de 57 toneladas para esse tipo de combinação veicular, com uma tolerância de 5% de variação, de acordo com a legislação.

A operação de descarregamento das toras ocorreu no pátio de madeira na fábrica da empresa, onde as toras eram despejadas direto nas mesas picadoras, com 7,5 metros de largura. A operação foi realizada por 2 máquinas da marca Kalmar, do mesmo modelo (Tabela 6).

Tabela 6 - Imagem, marca, modelo e especificações técnicas da máquina de descarregamento.

Imagem	Marca e Modelo	Especificações Técnicas
	Kalmar TW RTD 2626	Rodado de 4 pneus, com potência do motor de 285 HP, força de tração de 196 kN, capacidade operacional de 26 Mg, altura máxima de trabalho de 9,55 metros.

Fonte: Adaptado de Kalmar, 2020.

4.4 Base de dados e controles

Todos os dados analisados neste estudo foram extraídos do Sistema de Gerenciamento Florestal (SGF), utilizado para controlar todas as operações florestais da empresa. O SGF é uma ferramenta que possibilita uma visão completa de todas as operações da empresa, bem como conexão de base de dados pré-cadastrados.

Informações como o volume transportado por viagem entregue à fábrica, o PBT e o peso líquido constam na base de dados utilizada no estudo, bem como a tara dos veículos e o tempo pós-corte (TPC) da madeira.

O volume da madeira entregue na fábrica é medido pelo método de deslocamento de água, baseado no princípio de Arquimedes (MICHALAK *et al*., 2022), onde a madeira de cada compartimento é submersa em água e os controladores de pátio registram o volume, posteriormente os dados são enviados para serem armazenados no SGF.

Para a pesquisa, foram selecionados os dados de uma mesma floresta, em que 70% dos talhões foram cortados com comprimento de 6,8 metros, e a outra parte com 7 metros. Os dados foram filtrados apenas no período em que ocorreu o transporte simultâneo com os dois comprimentos de toras, de 01/02/2025 a 31/03/2025, nesse período ocorreu o transporte com os dois comprimentos de toras.

Como evidenciaram Kozakiewicz *et al.* (2021), a RPV da madeira, influencia diretamente no peso total dos veículos de transporte e no volume de material

transportado. Por esse fator, um controle foi adotado para essa variável não interferir nos resultados do estudo, os dados das cargas entregues com as menores RPVs (inferiores a 700 kg/m³) foram expurgadas do teste. A RPV foi determinada por uma equação, em que o peso líquido da carga foi dividido pelo volume entregue (FLORIANO, 2021).

$$R \quad RPV = \frac{PL}{V} \qquad (2)$$

Em que: **RPV** é a relação peso/volume (kg/m³); **PL** é o peso líquido (Mg); **V** é o volume (m³).

Após a aplicação dos filtros na base proveniente do SGF, e expurgo das viagens com as menores RPVs, os dados foram exportados em formato de planilhas para o software Microsoft Excel 365®, resultando em dados de 509 cargas entregues à fábrica da empresa, 255 cargas entregues com toras de 6,8 m e 254 cargas entregues com toras de 7 m. Para assegurar a mesma quantidade de repetições por tratamento, foram escolhidos os dados de 254 viagens transportando toras de 6,8 m aleatoriamente.

4.5 Análise de dados

4.5.1 Intensidade Amostral

Após a extração dos dados, foi conduzido o cálculo de suficiência amostral, a fim de identificar se o número de amostras foi suficiente para a realização das análises estatísticas. Foi utilizada a fórmula para o cálculo do tamanho amostral para duas médias independentes (PELLICO; BRENDA, 1997; SOARES *et al.*, 2007 apud LAMFLOR, 2018).

$$n = \frac{t^2 S_y^2}{E^2 + \frac{t^2 S_y^2}{N}} \qquad (3)$$

Em que: **n** é a Intensidade amostral; **t** é o nível de confiança via teste t (confiança de 5%); $\boldsymbol{S_y^2}$ é a variância da característica de interesse avaliada; **E** é o erro máximo admissível (0,05); e **N** é o número de cargas entregues pós controles.

4.5.2 Análises estatísticas

Para verificar a influência do comprimento de toras na eficiência do transporte rodoviário de madeira, foram utilizados testes de comparação de médias entre grupos para as variáveis resposta volume transportado (m³), PBT (Mg) e RPV (kg/m³).

Foram atribuídos dois tratamentos referentes ao comprimento de toras (6,8 m e 7,0 m de comprimento) e 254 repetições referentes às viagens para cada comprimento de toras (Tabela 7).

Tabela 7 - Variáveis analisadas, tratamentos e número de repetições.

Influência do comprimento de toras no volume transportado		
Variável Resposta	Tratamentos	Repetições
Volume transportado (m³)	Tratamento 1: Toras de 6,80 m de comprimento; Tratamento 2: Toras de 7,00 m de comprimento.	n= 1, 2, 3, 4, (...), (254)
Influência do comprimento de toras no Peso Bruto Total (PBT)		
Variável Resposta	Tratamentos	Repetições
Peso Bruto Total – PBT (Mg)	Tratamento 1: Toras de 6,80 m de comprimento; Tratamento 2: Toras de 7,00 m de comprimento.	n= 1, 2, 3, 4, (...), (254).
Influência do comprimento de toras na Relação Peso Volume (RPV)		
Variável Resposta	Tratamentos	Repetições
Relação peso/volume - RPV (kg/m³)	Tratamento 1: Toras de 6,80 m de comprimento; Tratamento 2: Toras de 7,00 m de comprimento.	n= 1, 2, 3, 4, (...), (254).

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados foram submetidos ao teste Shapiro-Wilk de normalidade de dados, em seguida ao teste de Levene para homogeneidade das variâncias. Para dados paramétricos, seria utilizado o teste T de Student, a um nível 5% de probabilidade de erro, enquanto para dados não paramétricos foi utilizado o teste U de Mann-Whitney, a um nível de 5% de probabilidade de erro. Os dados foram analisados no software R, versão R 4.4.0 (R CORE TEAM, 2025), utilizando os pacotes tidyverse (WICKHAM et al., 2019), ggpubr (KASSAMBARA, 2023) e car (FOX; WEISBERG, 2019), e as funções *shapiro.test()* e *wilcox.test().*

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação da suficiência amostral

Os resultados referentes a suficiência amostral são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Suficiência amostral para análise da influência do comprimento de toras no transporte rodoviário de madeira.

Tratamentos	Variável de interesse	Número de viagens após controles	Número necessário de viagens
6,80 m de comprimento	Vol.	254	250
	PBT		248
	RPV		254
7,00 m de comprimento	Vol.	254	250
	PBT		243
	RPV		254

Nota: Vol. = Volume (m³); PBT = Peso Bruto Total (Mg); RPV = Relação Peso/Volume (kg/m³).

Fonte: O autor.

De acordo com a Tabela 8, o número necessário de viagens para caracterização das variáveis volume (m³), PBT (Mg) e RPV (kg/m³) foram suficientes para a amostragem.

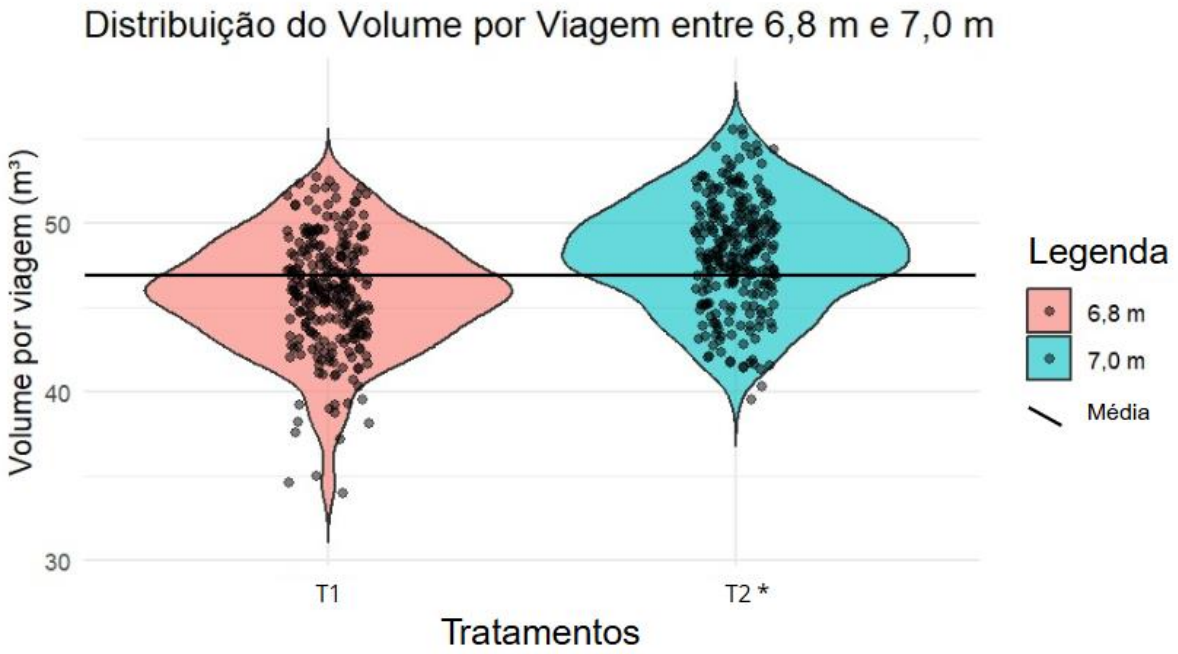
5.2 Influência do comprimento de tora sobre o volume transportado por viagem

Para a variável resposta volume por viagem (m³), o teste de normalidade de Shapiro-Wilk não apresentou distribuição normal para o tratamento de 6,8 m ($p<0,0019$), enquanto para o tratamento de 7m, os dados possuem distribuição normal ($p>0,19$).

Por pelo menos um tratamento ter demonstrado não normalidade nos dados, foi descartada a utilização do teste T, sugerindo a utilização de um teste não paramétrico. O teste não paramétrico U de Mann-Whitney revelou que os dois comprimentos de toras demonstraram diferenças estatisticamente representativas para as variáveis de volume/viagem ($p < 0,01$).

A análise de influência do comprimento de tora no volume transportado por viagem é apresentada na Figura 8. Para as viagens transportando toras de 6,8 metros,

foi observado uma média de volume por viagem de 45,8 m³, com um desvio padrão de 3,36 m³ e coeficiente de variação em torno de 7%, demonstrando baixa variação nos dados. Enquanto para a madeira de 7 metros a média observada foi de 48,2 m³, um desvio padrão semelhante, de 3,25 m³ e coeficiente de variação inferior a 7%.



Nota: T1 = tratamento 1, referente as viagens transportando toras de 6,8 m; T2 = tratamento 2, referente as viagens realizadas transportando toras de 7 m; * significativo a 5% de probabilidade.

Figura 7 - Influência do comprimento de tora no volume transportado por viagem

Fonte: Dados da pesquisa.

É possível observar que existem diferenças significativas entre os dois comprimentos de toras, em que a operação com a madeira de 7 metros transportou 2,35 m³ a mais de madeira comparando com a média do transporte da madeira de 6,8 m, e 1,18 m³ a mais comparado com a média dos dois tratamentos.

Nas 254 viagens transportando toras cortadas com 6,8 m foi entregue um volume total de 11.634 m³, considerando os resultados apresentados neste estudo, seriam necessárias 241 viagens com toras cortadas com 7 metros para transportar o mesmo volume de madeira.

Esses resultados corroboram com estudos recentes de Arcego *et al*. (2019) e Belisário *et al* (2022), que reforçam a hipótese de que o aumento do comprimento de toras influencia diretamente o volume de madeira transportada, indicando que a escolha do comprimento de toras ideal pode ser fundamental para a otimização da

operação de transporte rodoviário florestal, possibilitando maior aproveitamento da caixa de carga dos veículos.

Apesar do aumento do comprimento de toras representar um volume maior transportado por viagem, essa alteração pode acarretar uma extrapolação do limite de peso. No estudo irlandês conduzido por O'Connor *et al*. (2015), os autores destacaram que o aumento no comprimento de toras trouxe riscos de exceder o peso máximo permitido para a combinação veicular, exigindo um balanceamento entre volume e conformidades legais.

O aumento no comprimento de toras, pode representar ganhos na operação de transporte sem impactar outras etapas da produção de madeira, como por exemplo a colheita. Em um estudo conduzido por Nakazawa *et al.* (2019), foi observado que a colheita mecanizada de pinus com toras de 8 metros de comprimento não demonstrou nenhum ganho significativo operacional ao comparar com a operação realizada com toras de 6 metros.

Estudos atuais apontam que alterações em pequenas escalas no comprimento das toras transportadas não impacta significativamente o desempenho operacional nas atividades de carregamento e descarregamento da madeira, indicam que fatores como o diâmetro das toras, o volume por peça, o número de feixes por viagem e a organização das pilhas no campo exercem maior influência sobre a eficiência (AKAY *et al.,* 2020, GHAFFARIYAN, 2021).

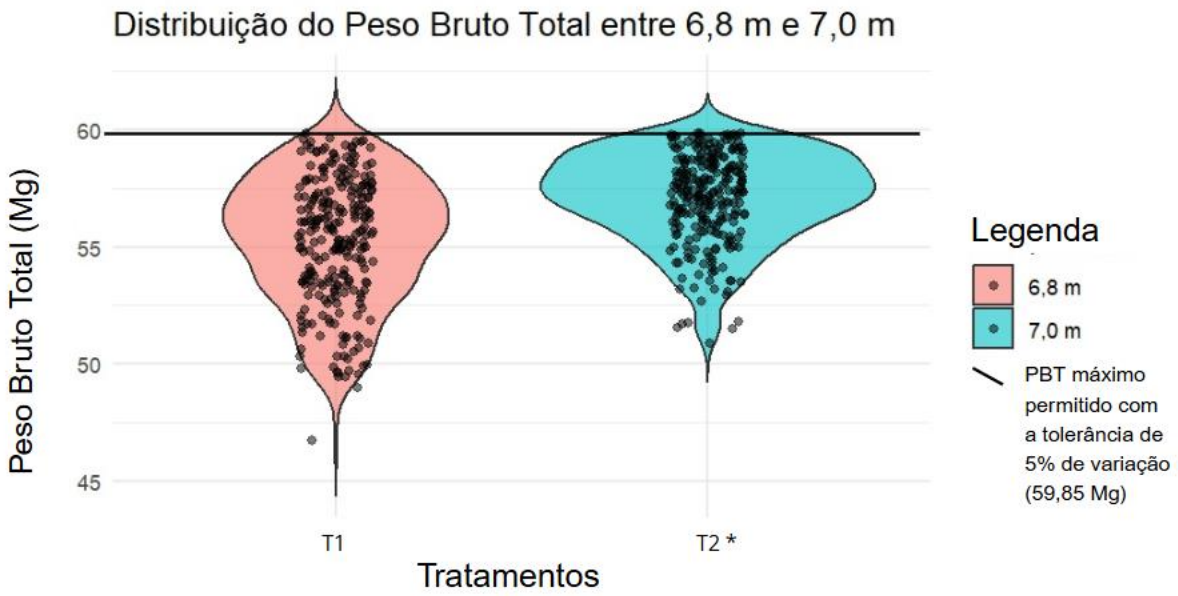
5.3 Influência do comprimento de tora no peso bruto total dos veículos

Para a variável resposta PBT (Mg), os p-valores observados no teste de normalidade de Shapiro-Wilk foram inferiores a 0,05 ($p < 0,01$) para os dois tratamentos, indicando que os dados não seguem uma distribuição normal. Diante da não normalidade dos dados e inviabilidade do uso do teste T, foi conduzido o teste não paramétrico U de Mann-Whitney.

Assim como para a variável resposta volume (m^3), o teste não paramétrico U de Mann-Whitney demonstrou que houve diferenças significativas ao comparar os dados das viagens realizadas com toras de 6,8 e 7 metros para a variável PBT ($p < 0,01$).

A análise de influência do comprimento de tora no PBT dos veículos no transporte rodoviário de madeira é apresentada na Figura 9. Analisando o peso bruto total dos veículos de transporte, foi observado uma média de 55,3 Mg, um desvio

padrão de 2,7 Mg e um coeficiente de variação inferior a 5% para o tratamento 1, com o comprimento de toras de 6,8 metros. No transporte da madeira de 7 metros, foi observado uma média de PBT de 57,1 Mg, um desvio padrão de 3,68 Mg e um coeficiente de variação inferior a 4%.



Nota: T1 = tratamento 1, referente as viagens transportando toras de 6,8 m; T2 = tratamento 2, referente as viagens realizadas transportando toras de 7 m; * significativo a 5% de probabilidade.

Figura 8 - Influência do comprimento de tora no PBT dos veículos.

Fonte: Dados da pesquisa.

Foi possível observar um aumento médio de 3% (1,8 toneladas) no PBT dos veículos de transporte no tratamento 2 (toras com 7 m) comparando com a média do PBT no tratamento 1 (6,8 m), demonstrando que a alteração do comprimento de toras interferiu diretamente no PBT realizado por viagem.

Esse acréscimo, apesar de estatisticamente relevante, representa apenas 3,3% de alteração no PBT observado por viagem, o que operacionalmente não representou grandes implicações, principalmente por não ter extrapolado o limite máximo permitido de peso para a combinação veicular utilizada no estudo.

Resultados semelhantes foram observados por Brown (2021), em que o autor destacou que a eficiência operacional no transporte florestal é mais sensível à tara e à configuração dos veículos do que a acréscimos modestos no peso transportado. Palander et al. (2020) em um estudo de simulação na Finlândia, observaram que

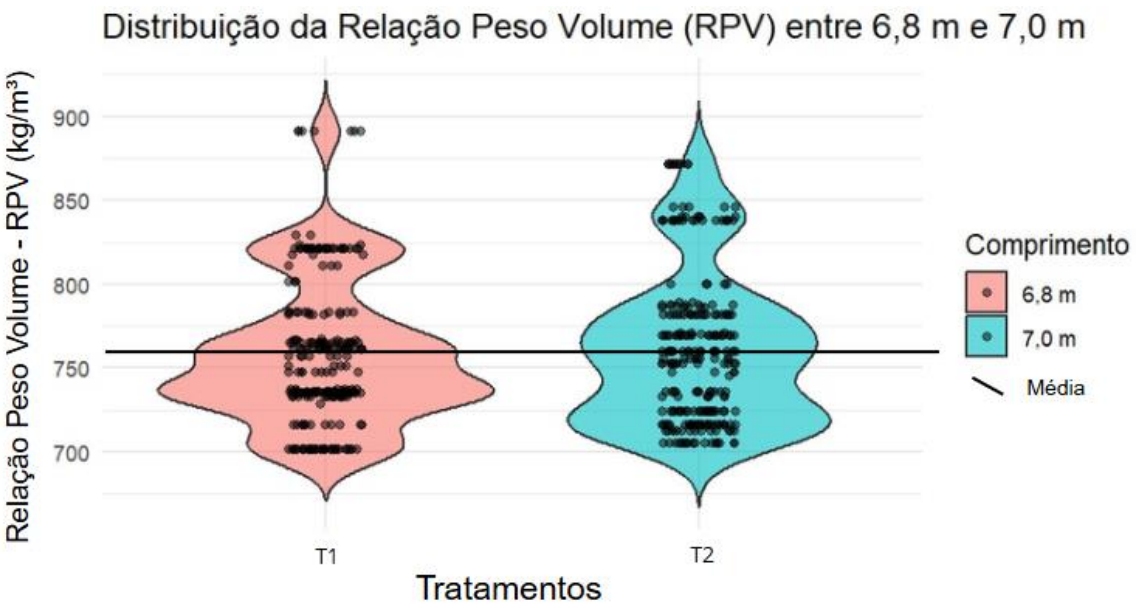
variáveis como distância de transporte e planejamento logístico têm maior influência sobre o desempenho operacional do que pequenas diferenças no PBT dos veículos.

Tais resultados também foram observados por Belisário *et al* (2022), que ao comparar o transporte de toras de eucalipto de 6 m e 7 m, observou um incremento de 8,17% no PBT dos veículos. Outros estudos recentes concluem que o aumento no comprimento de toras pode elevar o peso dos veículos de modo que impossibilite o uso completo da caixa de carga, inviabilizando possíveis ganhos de volume por viagem (TRZCIŃSKI *et al*., 2022, LARKIN *et al*., 2021), indicando a necessidade da realização de análises detalhadas em todo o contexto operacional para a tomada de decisões assertivas.

5.4 Influência do comprimento de toras na relação peso/volume (RPV) da madeira

Para a variável de RPV, assim como para a variável PBT, os p-valores observados no teste de normalidade de Shapiro-Wilk foram inferiores a 0,05 ($p < 0,01$), indicando que os dados também não seguem uma distribuição normal. O teste U de Mann-Whitney não evidenciou diferenças significativas entre os grupos ($p = 0,5429$), sugerindo que as variações observadas no volume/viagem e PBT não foram influenciadas pela RPV.

Os resultados da análise comparativa das médias da RPVs são apresentados na Figura 10. Observou-se médias similares comparando os dois grupos, onde para o tratamento 1 (madeira cortada com 6,8 m de comprimento) a média foi de 758,2 kg/m³, o desvio padrão observado foi de 42,8 kg/m³ e com coeficiente de variação inferior a 6%. Para as viagens transportando a madeira de 7 m, correspondendo ao tratamento 2, a média observada foi de 761,3 kg/m³, com desvio padrão de 44,8 kg/m³ e coeficiente de variação também inferior a 6%.



Nota: T1 = tratamento 1, referente as viagens transportando toras de 6,8 m; T2 = tratamento 2, referente as viagens realizadas transportando toras de 7 m

Figura 9 - Influência do comprimento de toras na Relação Peso Volume (RPV) de cargas do transporte rodoviário de madeira.

Fonte: Dados da pesquisa.

É possível notar um incremento médio de 2,7 kg/m³ (<0,5%) quando comparado as viagens transportando toras de 6,8 m e 7 m. Como os coeficientes de variação ficaram inferiores a 6%, é possível afirmar que há uma baixa dispersão relativa dos dados, demonstrando que a variação da RPV observada em cada grupo do teste não foram substancialmente relevantes, indicando que os resultados obtidos analisando as variáveis de volume/viagem e PBT não foram influenciados pela variável RPV.

Como a RPV da madeira influencia diretamente no peso e volume do material, assegurar que os valores dessa variável sejam similares garantem uma maior confiabilidade nos resultados apresentados por essa pesquisa (LEONELLO *et al.,* 2024, MOSKALIK *et al.,* 2022).

Em um estudo conduzido por Tomczak *et al* (2020) com pinheiros, os autores concluíram que outras variáveis (densidade básica e umidade da madeira) influenciam diretamente na massa por m³ da madeira, impactando diretamente no peso bruto total dos veículos de transporte. Tais resultados indicam que um planejamento preliminar levando todas essas variáveis em consideração, pode maximizar ainda mais a operação de transporte. Alternativas como a utilização de implementos maiores, ou

com mais eixos aumentando a capacidade de carga, podem ser adotadas a fim de aumentar o volume transportado sem exceder os limites de peso.

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que o aumento no comprimento de toras - de 6,8 metros para 7 metros - otimizou o transporte de madeira, refletindo em um aumento de 2,35 m³ na caixa de carga por viagem, sem exceder os limites de peso estabelecidos por lei.

Houve um aumento de 5% no volume transportado por viagem ao comparar os dois tratamentos (6,8 m e 7 m de comprimento de toras).

Em termos de PBT, verificou-se um incremento de 3% (1,8 Mg) dos veículos de transporte de madeira comparando os dois tratamentos (6,8 m e 7 m de comprimento de toras), sem ultrapassar o limite máximo de carga transportada.

As médias de relação peso/volume (RPV) da madeira não apresentaram variação relevante, variaram 2,7 kg/m³ comparando os dois tratamentos (6,8 m e 7 m de comprimento de toras), representando menos de 0,5% de variação.

Com base nessa pesquisa, para bitrens com PBT máximo permitido de 57 Mg e comprimento útil de carga de 7,5 metros, recomenda-se o transporte de toras de eucalipto cortadas com 7 metros de comprimento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUNA, M. Timber and biomass transport optimization: A review of planning issues, solution techniques and decision support tools. **Croatian Journal of Forest Engineering:** Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, v. 38, n. 2, p. 279-290, 2017.

ARCEGO, H. A.; ROBERT, Renato C. G.; BROWN, R. O. Effect of log length on forestry loading and unloading. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, p. e20170269, 2019. DOI: 10.1590/2179-8087.026917.

AKAY, A. E. et al. Productivity analysis of front-end loader in timber harvesting. **European Journal of Forest Engineering**, v. 25, n. 2, 2020.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. da. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, [S.l.], v. 21, n. 4, p. 649-656, 2015. DOI: 10.1590/01047760201521042006.

BELISARIO, A. V.; FIEDLER, N. C.; CARMO, F. C. A.; MOREIRA, G. L. Influence of log length on the productivity of wood harvesting and transportation. **Floresta**, Curitiba, v. 52, n. 1, p. 17–24, jan. /mar. 2022. DOI: 10.5380/rf.v52i1.73246

BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 24 set. 1997.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 882, de 13 de dezembro de 2021. Estabelece os limites de peso e dimensões de veículos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 14 dez. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 885, de 13 de dezembro de 2021. Dispõe sobre a Autorização Especial de Trânsito (AET). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 14 dez. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 907, de 28 de março de 2022. Estabelece requisitos de segurança para amarração de cargas. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 mar. 2022.

BROWN, M. W. Evaluation of the impact of timber truck configuration and tare weight on payload efficiency: an Australian case study. **Forests**, v. 12, n. 7, p. 855, 2021. DOI: 10.3390/f12070855.

CATERPILLAR. Escavadeiras Médias 320 – Tier 3. [Imagem]. 2025. Disponível em: https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/excavators/medium-excavators/126534.html. Acesso em: 7 jun. 2025.

CIDADE MARKETING. **Portal de notícias e comunicação em marketing e negócios.** [Imagem]. 2025. Disponível em: https://www.cidademarketing.com.br/. Acesso em: 15 mai. 2025.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. routledge, 2013. DOI: 10.4324/9780203771587.

DINIZ, C. C. C; CERQUEIRA, C. L; DE OLIVEIRA, F. M. **Influência do sortimento de toras na produtividade de um carregador florestal.** Agropecuária Científica no Semiárido, v. 14, n. 3, p. 247-253, 2018. DOI: 10.30969/acsa.v14i3.1050.

FACCHINI. **Implemento florestal para transporte de toras – Linha Off Road**. [Imagem]. 2024. Disponível em: https://www.facchini.com.br/produtos/implemento-florestal. Acesso em: 15 mai. 2025.

FERIGATO, E; SILVA, D. D. C. Os modais de transporte de carga no Brasil. **RECIMA21**, Uberlândia, v. 2, n. 2, p. 278–298, 2021. DOI: 10.47820/recima21.v2i2.94.

FLORIANO, E. P. **Dendrometria.** 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2021.

FOX, J.; WEISBERG, S. **An R Companion to Applied Regression. 3.** ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2019.

FRANCO, M. P.; BARREIRA, S. **A cadeia produtiva da celulose no Brasil.** Estudos em agronegócio: participação brasileira nas cadeias produtivas, v. 5, p. 149-172, 2021.

GHAFFARIYAN, M. R. Predicting productivity of timber loading operations: a literature review. **Silva Balcanica**, v. 22, n. 2, p. 81-90, 2021. DOI: 10.3897/silvabalcanica.22.e69240

GRUPO RF CAMINHÕES. Constellation – **portfólio de caminhões para transporte de carga pesada.** [Imagem]. 2025. Disponível em: https://www.gruporfcaminhoes.com.br/portfolio/constellation/. Acesso em: 15 jmai. 2025.

GUIMARÃES, P. P.; ARCE, J. E.; FIEDLER, N. C.; ROBERT, R. C. G. O transporte rodoviário florestal. **Enciclopédia Biosfera**. Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 13, n. 24, p. 780-794, 2016. DOI: 10.18677/EnciBio_2016B_073

IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores). **Relatório Anual 2024**. São Paulo: IBA, 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de unidades de relevo do Brasil (escala 1: 5 000 000).** Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível em: geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geomorfologia/mapas/brasil/relevo_2006.pdf. Acesso em: 9 jul. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2023**. (2024). Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2023_v38_informativo.pdf. Acesso em: 02 abr. 2025.

KASSAMBARA, A. **ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots.** R package version 0.6.0, 2023.

KENGEN, S. **Forestry in Brazil: A brief history.** Brasília, p. 50-54, 2019.

KOZAKIEWICZ, P; TYMFENDORF, Ł; TRZCINSKI, G. Importance of the moisture content of large-sized Scots pine (Pinus sylvestris L.) roundwood in its road transport. **Forests**, 2021, 12, 897. DOI: 10.3390/f12070897.

LACERDA, M. G.; BRITO, B. L. N.; LIMA, V. M. P. Precipitação provável e veranicos no Vale do Jequitinhonha-MG. **Recital – Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara/MG**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 36–51, 2020. DOI: 10.46636/recital.v2i2.138.

LACHINI, E. et al. Pesquisa operacional na minimização de custos de transporte florestal. **Revista Brasileira de Biomassa**, Lavras, v. 36, n. 2, p. 473-488, 2018. DOI: 10.28951/rbb.v36i2.221.

LARKIN, P; et al. Evaluation of the impact of timber truck configuration and tare weight on payload efficiency: an Australian case study. **Forests**, Basel, v. 12, n. 7, p. 855, 2021. DOI: 10.3390/f12070855.

LEONELLO, E. C. et al. The impact of wood moisture content on the productivity and costs of forest energy supply chains in southeast Brazil. **Forests**, v. 15, n. 1, p. 139, 2024.

LOPES, E. S.; VIEIRA, T. P.; RODRIGUES, C. K. Avaliação Técnica e de Custos do Transporte Rodoviário com Diferentes Espécies e Sortimentos de Madeira. **Floresta**, v. 46, n. 3, 2016. DOI: 10.5380/rf.v46i3.36826.

MACHADO, S. A.; LOPES, E. S.; MINETTE, L. J. Effect of Log Length on Forestry Loading and Unloading. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, p. 397-402, 2019. DOI: 10.1590/2179-8087.026917

MANOS IMPLEMENTOS. Entrega de carroceria florestal. [Imagem]. 2023. Disponível em: https://manosimplementos.com.br/entrega-de-carroceria-florestal-9/. Acesso em: 15 mai. 2025.

MASIOLI, W.; FIEDLER, N.C.; BRISSON, E. V.; ALMEIDA, A. T. S.; LACERDA, L. C. Variables que influyen en la productividad de la explotación maderera en un sistema de troncos cortos. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v.17, n.2, p. 01-14, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.2-300

MEDEIROS, J. L. V. M.; MOREAU, A. M. S. S.; MOREAU. M. S. A cultura do eucalipto na região do extremo sul do estado da Bahia: análises do uso da terra e socioeconômica. **Boletim Campineiro de Geografia**, v. 11, n. 1, 2021. DOI: 10.54446/bcg.v11i1.507.

MENSAH, P.; et al. The Global Supply Chain of Wood Products: A Literature Review. **Forests**, v. 16, n. 7, p. 1036, 2025.

MICHALAK, T.; et al. Methods of wood volume determining and its implications for forest transport. **Sensors,** v. 22, n. 16, p. 6028, 2022. DOI: 10.3390/s22166028.

MOSKALIK, T.; et al. Methods of wood volume determining and its implications for forest transport. **Sensors**, v. 22, n. 16, p. 6028, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/s22166028

PALANDER, T.; et al. The influence of gross vehicle weight (GVW) and transport distance on timber trucking performance indicators: a discrete event simulation case study in Central Finland. **International Journal of Forest Engineering**, 2020. DOI: 10.1080/14942119.2020.1757324.

R CORE TEAM. R: **a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 12 jul. 2025.

SILVA, J. N. M.; SANTOS, A. L.; OLIVEIRA, L. C. de. Comparison of Cut-to-Length Harvesting Methods in Tree Plantations in Brazil. **MDPI Forests**, [S.l.], v. 15, n. 3, 2024. DOI: 10.3390/f15030567.

TRZCIŃSKI, G; TYMENDORF, Ł. Axle load of round wood transport vehicles in relation to wood assortment. **Environmental Sciences Proceedings**, Basel, v. 22, n. 1, p. 12, 2022. DOI: 10.3390/IECF2022-13043.

TOMCZAK, K.; TOMCZAK, A.; JELONEK, T. Effect of Natural Drying Methods on Moisture Content and Mass Change of Scots Pine Roundwood. Forests, v. 11, n. 6, p. 668, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/f11060668

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Laboratório de Mensuração Florestal (LAMFLOR). **Capítulo V – Delineamentos Aleatórios Simples: Amostragem Casual Simples.** Vitória: UFES, 2018. Disponível em: https://lamflor.ufes.br/upload/disciplinas/inv-florestal/CapituloV_Delineamentos_Aleatorios_ACS.pdf. Acesso em: 12 ago. 2025.

VERACEL CELULOSE S.A. **Relatório de Sustentabilidade 2024**. Eunápolis, BA: Veracel Celulose, 2025. Disponível em: Relatorio-de-Sustentabilidade-Veracel-Celulose-2024-v1.pdf. Acesso em: 27 maio 2025.

VIRGENS, A. P.; FREITAS, L. C. de; SILVA, M. L. Avaliação financeira e gerenciamento de risco para diferentes distâncias de transporte de madeira pelo

modal rodoviário. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, p. 880-897, 2020. DOI: 10.5902/1980509835470.

VOLVO TRUCKS BRASIL. **Volvo FMX MAX: caminhão vocacional para aplicações severas.** [Imagem]. 2025. Disponível em: https://www.volvotrucks.com.br/pt-br/trucks/models/volvo-fmx/fmx-max.html. Acesso em: 18 jun. 2025.

WICKHAM, H. *et al*. **Welcome to the tidyverse**. Journal of Open-Source Software, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019. DOI: 10.21105/joss.01686.