



LUANA CRISTINA NAVES DE SOUZA

**PLANEJAMENTO OPERACIONAL DO TRANSPORTE DE
MADEIRA: UM ESTUDO DE CASO**

**LAVRAS-MG
2023**

LUANA CRISTINA NAVES DE SOUZA

**PLANEJAMENTO OPERACIONAL DO TRANSPORTE DE MADEIRA: UM
ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Florestal, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Lucas Resende Gomide
Orientador

**LAVRAS-MG
2023**

LUANA CRISTINA NAVES DE SOUZA

**PLANEJAMENTO OPERACIONAL DO TRANSPORTE DE MADEIRA: UM
ESTUDO DE CASO**

OPERATIONAL PLANNING FOR WOOD TRANSPORTATION: A CASE STUDY

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Florestal, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 24 de Novembro de 2023.
Prof.Dr. Lucas Rezende Gomide. DCF UFLA
Dr Kalill José Viana da Páscoa DCF UFLA
Dr Carlos Delano Cardoso de Oliveira DCF UFLA

Prof.Dr. Lucas Resende Gomide
Orientador

**LAVRAS-MG
2023**

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre estar à frente de todos os meus planos, me fazendo prosperar, guiando o meu caminho e me reerguendo nos momentos difíceis. A ti dou graças!

Aos meus queridos e amados pais, Rosângela e Francisco por todo apoio e amor incondicional.

A minha melhor amiga e irmã Glaucia pelo incentivo e confiança no meu potencial.

Ao meu companheiro de vida e grande amor, Deyvid, pela cumplicidade, paciência, incentivo e por tornar essa jornada mais leve, assim como deve ser.

Aos meus dois amados sobrinhos, Luiza e Kauan, a vocês dedico o meu trabalho.

Aos meus amigos, em especial o meu grupo 17/2 pela parceria, apoio, e momentos de descontração, sentirei falta de todos.

As novas amizades que criei na GFL, em especial a Larissa, pela grande contribuição nesse trabalho.

Ao meu time de planejamento, por despertar em mim a paixão pela área.

Ao meu orientador, Prof. Lucas Resende Gomide, que mesmo diante das adversidades não soltou a minha mão, me orientando, apoiando e oferecendo as ferramentas necessárias para a minha formação profissional.

A Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências Florestais por tornar tudo possível.

Ao Corpo Docente e Técnico do Departamento de Ciências Florestais, por todos os ensinamentos e parcerias realizadas na trajetória.

A todos que de alguma forma estiveram presentes torcendo por mim. Muito Obrigada!

RESUMO

O planejamento florestal é uma atividade fundamental no campo do empreendimento florestal, pois leva em consideração todos os aspectos específicos para o desenvolvimento de suas atividades. Nesse contexto, o planejamento desempenha um papel crucial no que tange ao transporte, uma vez que essa operação é responsável por uma das maiores parcelas de custos no empreendimento. Nesse sentido, a utilização da Programação Linear Inteira Mista desempenha um papel importante, contribuindo para solucionar de forma eficiente vários desafios. O principal objetivo desse estudo consistiu em elaborar um modelo de otimização determinístico com a finalidade de otimizar o transporte florestal, levando em consideração restrições como a demanda mensal de suprimento de madeira no pátio, a capacidade máxima de toneladas transportadas por mês, horas de trabalho e os tempos necessários para os deslocamentos de cada veículo. A área de estudos abrange 1.115,73 hectares distribuídos em 20 talhões, nos quais a produtividade foi estimada e os volumes convertidos em peso, a fim de permitir a realização de cálculos relacionados ao transporte. A otimização do modelo foi realizada com o auxílio do *solver* Gurobi implementado em Python. O modelo proposto obteve soluções ótimas para o problema apresentado, o que resultou em volumes de madeira que abastecem o pátio mensalmente, escolha do melhor veículo e o número adequado de viagens realizadas, respeitando o limite de carga horária previamente estabelecido. Os resultados obtidos representaram a segmentação de talhões em três grupos que atendem as demandas mínimas mensais. No primeiro mês, um total de 7 talhões foram acessados para o transporte de madeira, com um peso total de 50.290,24 toneladas por mês distribuídas em 684 viagens. No segundo mês, foram necessárias 594 viagens para transportar um total de 43.708,32 toneladas por mês, distribuídas em 7 talhões. E no terceiro mês, foram realizadas 637 viagens para transportar 46.904,73 toneladas por mês, distribuídas em 6 talhões. Todas as viagens foram realizadas pelo veículo Tritrem, que foi identificado como a melhor escolha com base no modelo, respeitando o limite máximo de 5.400 horas por mês. As resoluções demonstraram consistência e confiabilidade, evidenciando que a técnica de Programação Linear é uma ferramenta flexível que proporciona soluções confiáveis para tomadas de decisão. Embora o projeto tenha sido aplicado como estudo de caso, suas abordagens podem ser replicadas em uma escala macro.

Palavras-chave: Planejamento. Otimização. Programação Linear. Transporte Florestal. Abastecimento de Madeira.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	8
2.1 Indústrias 4.0 e silvicultura de precisão.....	8
2.2 Planejamento florestal.....	10
2.3 Estradas e transporte florestal.....	12
2.4 Programação linear	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Base de dados.....	17
3.2 Modelo matemático de programação linear inteira mista	19
4 RESULTADOS	22
5 DISCUSSÃO	25
6 CONCLUSÃO.....	27
REFERÊNCIAS.....	28

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal, mais especificamente o de florestas plantadas no Brasil, ocupa atualmente 9,93 milhões de hectares, sendo as árvores plantadas fonte de matéria prima responsável por 91% de toda a madeira produzida, diminuindo a pressão da exploração de florestas nativas, além de contribuir para o fornecimento de biomassa, lenha e carvão vegetal (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2022). Em 2021, apresentou a maior receita do setor em sua história, chegando a um faturamento anual de R\$244,6 bilhões, apontando a sua grande contribuição no PIB do país, além de gerar milhões de empregos diretos e indiretos (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2022).

Com o aumento significativo nas demandas por produtos florestais, o setor vem investindo cada vez mais na utilização de tecnologias digitais, sendo uma realidade a floresta 4.0. Essa revolução tecnológica é refletida na maioria das operações florestais, como nos investimentos de máquinas de colheita, análise e mineração de dados, intervenções localizadas nas florestas, usos de imagens de satélites entre outros.

Logo, para garantir a competitividade das empresas florestais, além do uso de novas tecnologias, é extremamente necessário um planejamento assertivo, que assegure o cumprimento dos objetivos definidos a curto ou longo prazo. Essas ações antecipam prováveis problemas relacionados a questões técnicas, oscilações de mercado e orçamentárias, mantendo o uso sustentável da floresta de forma a continuar abastecendo a cadeia de produção, sempre adaptando aos critérios econômicos, sociais e ambientais.

O nível de detalhamento das informações do horizonte de planejamento considera a visualização de problemas de quantificação de madeira, produção da floresta, regimes de desbastes, agenda de colheita relacionada com a construção das estradas entre outros (RODRIGUES, 2001). Uma vez que o planejamento atua diretamente nas tomadas de decisões, ela se torna atividade indispensável de qualquer empreendimento.

No contexto do setor florestal, mundial o transporte é uma das atividades de maior relevância em termos de geração de custos (BERGER; et al., 2003). São vários os fatores que exercem influência sobre o desempenho e os custos relacionado ao transporte florestal, como a escolha do tipo de veículo empregado, as condições da rede viária, as condições locais, a distância do local de origem até a fábrica, tempo de carga e descarga, bem como os períodos de espera.

Dentre os fatores mencionados, a distância é um dos elementos de maior relevância, pois ela exerce influência sobre diversos aspectos do transporte como o volume de madeira a ser transportado, os turnos de trabalho, os dias de operação e a configuração da frota de veículos. Para maiores distâncias, a utilização de veículos de maior capacidade de carga se torna indispensável para otimizar a eficiência operacional. Além disso, é fundamental atentar para os tempos de carga e descarga, assim como o tempo de espera, a fim de evitar possíveis gargalos na cadeia de transporte. O gerenciamento desses fatores desempenha um papel importante na busca por um transporte florestal eficiente e economicamente viável.

Dentro desse desafiador cenário, o planejamento florestal desempenha um papel importante no que tange ao planejamento do transporte. A partir desse planejamento, uma série de fatores são contemplados, incluindo a escolha do melhor veículo, a definição do número de turnos, a seleção dos produtos a serem transportados, a elaboração das rotas, a determinação dos horários de trabalho, a gestão das cargas movimentadas para o pátio, dentre outras variáveis igualmente importantes.

Devido à complexidade de informações e regras a serem gerenciadas, recomenda-se o uso de métodos robustos para a obtenção da melhor resposta no planejamento florestal. Assim, a Programação Linear (PL) torna-se uma técnica indicada, sendo adotada mundialmente, com aplicação significativa no setor florestal. Sua origem se deu durante a Segunda Guerra Mundial, quando os pesquisadores foram desafiados a resolver problemas relacionados ao suprimento nutricional dos militares no qual desenvolveram técnicas de otimização utilizando a Programação Linear (PRADO,2016). A Programação Linear é versátil e pode assumir valores inteiros e não inteiros denominadas de Programação Linear inteira e Programação Linear mista respectivamente. No modelo de PL é formulada uma função objetivo na qual pretende-se otimizar o valor utilizando variáveis de decisão (ZIONTS, 1974). A Programação Linear desempenha um papel importante no setor florestal, contribuindo para a resolução eficiente de uma variedade de desafios, desde o planejamento do transporte até a otimização de recursos e a tomada de decisões estratégicas.

Com base nas informações apresentadas, o presente trabalho teve como objetivo principal elaborar um modelo de otimização determinístico destinado a aperfeiçoar a operação de transporte florestal. O modelo considerou diversos fatores, como a demanda mensal de suprimento de madeira no pátio, a capacidade máxima de toneladas transportadas no mês, as restrições de horas de trabalho e o tempo necessário para os deslocamentos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Indústrias 4.0 e silvicultura de precisão

Em todo o histórico mundial, é possível notar os marcos evolutivos referentes aos padrões sociais, econômicos e políticos. Esses padrões são marcados pelas revoluções industriais que desencadearam grandes avanços tecnológicos e desenvolvimento, essas mudanças causam alterações nas estruturas organizacionais e na sociedade (CONCEIÇÃO, 2012). A Primeira Revolução Industrial foi marcada pela introdução do novo método de produção, o sistema fabril, no século XVIII (1780-1830), na Inglaterra, com a alavancagem da indústria têxtil que era responsável por maior parte da produção nos países mais desenvolvidos (CONCEIÇÃO, 2012). Segundo Almeida (2005), a primeira revolução industrial presenciou a substituição do esforço humano pelas caldeiras e máquinas movidas a vapor, o que proporcionou grande desenvolvimento nas indústrias manufatureiras. Para Drucker (2000), a criação da estrada de ferro foi o fator mais importante dessa época, pois as ferrovias transformaram a economia e ampliaram a noção de espaço geográfico expandindo a mobilidade das pessoas.

No início do século XX, o foco da Segunda Revolução Industrial se voltou para os novos modelos de energia, elétrico e químico, e, com isso, a descoberta do aço e petróleo e o surgimento do motor a combustão, a química da soda, entre outros (MORAES; FADEL, 2008). Desse modo, o período é marcado por descobertas técnicas e científicas, que geraram novos produtos e ampliaram o nível de consumo para além da produtividade de trabalho, gerando um padrão de organização mais produtivo e trabalhista (MORAES; FADEL, 2008). A Terceira Revolução Industrial, que vai desde a década de 1970 até os dias atuais, marca o período da complementação do trabalho humano pelo computador, o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos, a expansão da internet e do e-commerce (ALMEIDA, 2005). De acordo com Moraes e Fadel (2008), o surgimento dos computadores, a modificação nos meios de comunicação e a aplicação da informática nos processos produtivos alteraram os modelos de produção e trabalho, gerando produtos com qualidades melhores e mais competitivas no mercado.

A Indústria 4.0, também conhecida como Quarta Revolução Industrial, vem como uma estratégia de longo prazo do governo alemão para assegurar a competitividade de suas indústrias (SANTOS et al., 2018). Essa revolução representa uma transformação nos processos produtivos do setor industrial, empregando o conjunto de diversas tecnologias no

cotidiano do trabalho, interligando a mão de obra dos trabalhadores com as novas tecnologias de maneira colaborativa (SANCHES; CARVALHO; GOMES, 2019). Nesse cenário, tudo tende a se conectar devido à crescente interconexão de produtos através da Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*), Análise de Grandes conjuntos de Dados (*Big Data Analytics - BDA*), e Sistemas Cyber-Físicos (*Cyber-Physical Systems – CPS*), que proporcionam a manipulação de objetos e máquinas remotamente devido a sensores que coletam, armazenam, mineram dados e produzem estatísticas e previsões do processo, buscando otimização e melhoria (SANCHES; CARVALHO; GOMES, 2019).

O setor florestal tem avançado na utilização das tecnologias digitais, com o uso de drones, internet das coisas, sensoriamento remoto, entre outros. A floresta 4.0 já é uma realidade na maioria das operações florestais, sendo, além de uma revolução tecnológica, uma revolução de modelos de negócio com a interação ser humano-máquina. Essa integração de usuários e dispositivos atua nas tomadas de decisões com a qualidade necessária e alcançando resultados efetivos (LOPES, 2021). O setor florestal no cenário atual demanda inovações tecnológicas e isso reflete no investimento em máquinas de colheita como o Harvester e Forwarder que, além de aumentar o conforto e segurança dos colaboradores, ainda apresentam vantagens econômicas, ambientais e operacionais, como a digitalização das informações (ABREU; LANA; RIBEIRO, 2019).

Há um aumento significativo nas demandas por produtos florestais aliados com o aumento dos custos de produção, exigindo do mercado produtos certificados e de produção florestal sustentável (MAEDA et al., 2014). Segundo Brandelero, Antunes e Giotto (2007), a silvicultura de precisão vem como uma nova forma de produção e administração das florestas, pois, diferente do sistema convencional, que abordava a floresta como uma unidade uniforme, a silvicultura de precisão aborda a área em diferentes qualidades de sítios. A silvicultura de precisão baseia-se em algumas fases como a coleta e análise de dados, o gerenciamento da informação, a intervenção localizada na floresta e a avaliação dos resultados com exatidão e precisão adequada (BRANDELERO; ANTUNES; GIOTTO, 2007). As empresas mais tecnológicas têm investido no levantamento de dados com o uso de geotecnologias como detecção de imagem de satélite, dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*), entre outros (MAEDA et al., 2014). As técnicas de geoprocessamento são as mais utilizadas, pois auxiliam na identificação das variáveis que afetam a produção florestal por sobreposição, cruzamento e regressão de mapas digitais, fornecendo informações mais detalhadas, auxiliando nas tomadas de decisões, maximizando os lucros e economizando recursos (BRANDELERO; ANTUNES;

planejamento a longo prazo, com menor grau de detalhamento das informações e visão de produção em larga escala (BETTINGER et al., 2009). Os cenários são criados para ilustrar o desenvolvimento sustentável da floresta, levando em consideração também os quesitos sociais, técnicos, industrial, econômico, demográfico, ecológico e de legislação local (MITCHELL, 2004).

O nível tático é guiado pelo horizonte de planejamento de médio prazo, com um nível de detalhamento das informações maior e mais preciso do que o nível estratégico. Ele considera as relações espaciais e as atividades de manejo. São utilizadas informações geográficas de crescimento e produção da floresta, a agenda é baseada na colheita florestal, sendo projetado o que irá ser cortado a cada ano e, então, relacionado com as atividades silviculturais (BETTINGER et al., 2009). Nesse nível, são incluídas as restrições de custos de estradas, qual a melhor alternativa de manejo, relação demanda e oferta, entre outros (MITCHELL 2004).

O nível operacional é o nível mais baixo da hierarquia, tem o horizonte de planejamento de curto prazo, com as decisões guiadas para o atendimento das metas e as informações vindas do planejamento estratégico e tático (RODRIGUES, 2001). Os planos operacionais são detalhados como cada atividade será desenvolvida, disponibilidade de maquinário e mão de obra, orçamentos diário, semanal ou mensal, e a entrega das atividades (BOYLAND,2003).

O planejamento desempenha a função de antecipar diversos tipos de problemas, como a quantificação de madeira, atendimento de demandas, fluxo de caixa, produção da floresta de maneira sustentável, regimes de desbastes, problemas associados a transporte e infraestruturas, entre outros (RODRIGUES,2001). Seixas (1992) reforça a necessidade das empresas se planejarem quanto ao transporte, pois sendo uma das atividades que mais geram custo dentro do meio, é importante que considere a escolha do veículo mais adequado, o número de turnos e o fluxo de veículos sempre respeitando a infraestrutura de carga e descarga.

2.3 Estradas e transporte florestal

Segundo Machado (1989), as estradas são as vias mais importantes para o acesso à floresta, pois possibilitam o deslocamento da mão de obra, dos meios de produção utilizados para a implantação das florestas, proteção, colheita e transporte dos produtos florestais. As estradas devem atender aos aspectos sociais, apresentar viabilidade técnica, com menor custo de implantação e manutenção, além de não causar danos ao meio ambiente no qual está inserido (MALINOVSKI et al., 2004). Elas são estruturas essenciais responsáveis pelo desenvolvimento socioeconômico de uma região, proporcionando melhores oportunidades de estudo, saúde, turismo e estando diretamente associada aos aspectos de produção e suprimentos (CORRÊA; MALINOVSKI; ROLOFF, 2006).

Para iniciar o projeto de construção de uma estrada, é necessário um estudo prévio sobre qual o tráfego predominante. Para isso, são levantadas informações como o número médio de veículos que transitará e a composição da frota, por exemplo. Com o avanço no setor rural, o trânsito nas estradas conta com transporte de porte pesado como os treminhões de até nove eixos (DER/SP, 2012). Além dos estudos de tráfego, é necessário um levantamento preliminar da topografia para permitir a representação do relevo, dos cursos d'água, das linhas de transmissão, vegetação existente, entre outros. São necessários também estudos hidrológicos que fornecem informações sobre os níveis máximos de enchentes e as obras de vazão existentes, bem como o estudo geotécnico do local que identifica as áreas de brejos, os afloramentos rochosos, solos, entre outros (DER/SP, 2012).

Para Machado e Lopes (2000), as estradas podem ser caracterizadas quanto à sua geometria horizontal e vertical, largura e tipo de superfície de rolamento. Essas características são determinantes na velocidade de tráfego, o que está intimamente ligado ao custo do transporte florestal, pois os custos são calculados com base no rendimento, ou seja, quanto maior a velocidade menor o custo com o transporte. A geometria horizontal diz respeito ao relevo, a velocidade, a distância de visibilidade, ao tipo de solo, entre outros. Esses fatores interferem na velocidade de operação em pistas com raio de curva inferior a 20 metros (MACHADO; LOPES, 2000). É recomendado, por questões de segurança, que as curvas sejam amplas, de raios grandes e que se alternam as curvas horizontais à direita e à esquerda ao longo do traçado (DER/SP, 2012).

A geometria vertical se refere aos aclives e declives das estradas que, no meio florestal, não costumam ultrapassar 15%, a escolha por estradas mais acentuadas pode

acarretar em maior custo com o transporte e sua manutenção (MACHADO; LOPES, 2000). Por fim, as superfícies de pista de rolamento se diferem entre estrada pavimentada, aquelas revestidas de concreto, estradas com revestimento primário de material granular, como o cascalho, e a estrada sem revestimento, que normalmente é caracterizada por apresentar o solo no seu estado natural, sendo que essa característica influencia no desempenho do transporte (MORAES, 2014).

Machado (1989) ressalta a necessidade de um sistema de classificação para compreender os fatores inerentes às estradas e ao transporte florestal, ele propõe os modelos de classificação padronizado, flexível e codificado. Sendo o sistema de classificação padronizado proposto pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) que divide as estradas em estrada de acesso, que são similares às estradas públicas da região, e as estradas de alimentação, aquelas que dão acesso às florestas para diminuir a distância da extração florestal. A classificação usada na Áustria determina três tipos de categoria: as estradas principais, que são de conexão e desenvolvimento, apresentando uma melhor estrutura e maior tráfego de veículos; as estradas secundárias, responsáveis pelo acesso às áreas de operação florestal com uma estrutura mais simples; e o ramal, que conecta a área de derrubada aos pátios de estocagem, apresentando o próprio solo como superfície de rolamento (MACHADO, 1989).

O sistema flexível abrange um grande número de classificações que se ajustam às diversas situações de cada empresa e o sistema codificado, que adota símbolos para representar as especificações técnicas das estradas, assim as empresas não ficam dependentes de um sistema padrão, podendo optar por um sistema flexível, porém independente (MACHADO, 1989).

A rede viária apresenta forte relação com as operações de colheita. Em sincronia com isso, as decisões relacionadas ao planejamento tático da colheita influenciam diretamente as decisões de construção e manutenção de estradas (MOBTAKER et al., 2020), uma vez que elas garantem o acesso às áreas de corte (RÖNNQVIST et al., 2015). Visando a manutenção das estradas já existentes, o planejamento normalmente ocorre antes da realização das operações de colheita e transporte, e visa o nivelamento do leito e o preenchimento dos trechos erodidos, pois, além de aumentar o risco de erosão nas beiras das estradas, também possuem elevado custo (SHINZATO, 2023).

Apesar das inúmeras finalidades que as estradas apresentam para satisfazer o uso múltiplo da floresta, elas têm sido uma das principais causas de impactos ambientais

negativos, afetando principalmente a estabilidade do solo, o regime hídrico, a estética da área e a biodiversidade (MACHADO; SILVA, 2001). A erosão é apontada como o distúrbio mais significativo, sendo impactado pela característica geomorfológica do terreno, pela remoção da cobertura vegetal, desestruturação física do solo na atividade de terraplanagem e o volume de tráfego, que por sua vez, também contribui para a sedimentação dos cursos de água (MACHADO; SILVA, 2001).

Controlar processos erosivos é de extrema importância para a manutenção e funcionalidade das estradas. De acordo com MDEP (2016), a eficiência no controle de processos erosivos está diretamente relacionada com as manutenções preventivas das estradas não pavimentadas, sendo as medidas voltadas para controle do escoamento superficial, de forma que a água proveniente da estrada não se acumule na estrada e em suas margens. Os pesquisadores do MDEP (2016) também ressaltam pontos para obter melhores resultados no controle do processo erosivo:

- Monitorar firmemente as estradas no período chuvoso, pois é quando os problemas mais evidenciam;
- Planejar bem os projetos de melhoria antes de iniciá-los;
- Drenar a água da chuva para fora da estrada o quanto antes, evitando que a água presente seja direcionada para o leito do rio;
- Minimizar o solo exposto nas margens das estradas, para garantir uma boa estabilização e proteção do solo;
- Fazer o uso consciente da estrada, limitando as cargas e o fluxo de veículos durante o período chuvoso.

O transporte se tornou uma das atividades de maior importância dentro do setor florestal, devido ao elevado volume de carga movimentada e por ser necessário na ligação entre os pontos de origens e destinos das mercadorias (MACHADO, 1985). São vários os fatores que afetam o desempenho do transporte, entre eles o tipo de veículo, a rede viária florestal, as condições locais e os fatores inerente ao ser humano (LEITE, 1992). Pensando no fator econômico, para Silversides (1978), a distância é um dos principais fatores que interferem no custo do transporte, pois acarreta em decisões como volume transportado, números de turnos e a composição veicular, já que, grandes distâncias requerem veículos com maior capacidade de carga. Para problemas relacionados a distância, na área florestal é comumente utilizado a teoria dos grafos. Nessa teoria, a rede de estradas é representada por vértices e os algoritmos sequenciais identificam qual o caminho mínimo entre esses pares de

vértices buscando a solução ótima para problemas relacionados a alocação de rede de estradas. (AKAY et al., 2013).

Um ponto importante a ser ressaltado é que assegurar que o fluxo de veículos pesados seja reduzido, principalmente durante o período de chuvas, diminui grandemente os problemas financeiros e também aqueles relacionados à erosão e reduz a formação de buracos e sulcos que podem destruir a suspensão do veículo e deixar as estradas intransitáveis (MDEP, 2016), além de garantir o retorno dos investimentos realizados (DER/SP, 2012).

2.4 Programação linear

A Programação Linear (PL) é uma das técnicas de planejamento mais utilizadas na pesquisa operacional. Essa ferramenta surgiu no período da Segunda Guerra Mundial, momento em que os pesquisadores foram desafiados a solucionar problemas resumidos a suprir a demanda nutricional dos militares a baixo custo. Em 1947, George Dantzig elaborou o método simplex, capaz de resolver qualquer problema de Programação Linear, desenvolvendo técnicas de otimização para os problemas militares (PRADO, 2016). Nos dias atuais, esse método é utilizado para encontrar o valor máximo ou mínimo de uma função linear que contém um conjunto de possibilidades sujeitas a algumas restrições (MOREIRA, 2008).

A PL pode ser dividida em programação inteira e mista. Elas apresentam a mesma estrutura dos problemas de Programação Linear, porém possuem restrições de integralidade que impõem que as variáveis assumam valores inteiros. Caso assumam somente valores inteiro, então é denominada Programação Inteira, mas caso apresente pelo menos uma variável não inteira, são denominados problemas de Programação Mista (COSTA, 2005). Para Prado (2016), é comum ver as aplicações de PL nas rotinas de planejamento das demais empresas em diversas áreas, como em cenários de rotas de transporte, construções de infraestruturas, alocações de indústrias, entre outros.

Segundo Zionts (1974), a construção de um modelo de Programação Linear envolve uma função linear chamada de função objetivo, cujo valor se pretende otimizar. De acordo com esses autores, essa função é formada por variáveis de decisão que se expressam por meio de equações ou inequações lineares, chamadas de restrições do modelo, sendo que essas variáveis podem ser positivas ou nulas. A seguir, tem-se uma forma generalista e matricial de um modelo determinístico de Programação Linear em que c é um vetor linha de ordem $(m+n)$,

A é uma matriz $m \times (m+n)$, x é um vetor coluna de ordem $(m+n)$ e b é um vetor coluna de ordem m .

Maximize ou minimize

$$z = cx$$

Sujeito a

$$Ax = b$$

$$x \geq 0$$

De acordo com Johnson e Scheuerman (1977), o modelo matemático de Programação Linear é um dos métodos mais usados para solucionar problemas que envolvem planejamento florestal, sendo os modelos de formulação divididos em tipo I e tipo II. Rodrigues et al. (2006) relatam que no modelo tipo I cada unidade de manejo é adotada um conjunto de alternativas de manejo, sendo essas as alternativas que serão consideradas dentro do horizonte de planejamento, permitindo maior identidade da unidade de manejo. De acordo com esses autores, no modelo tipo II são adotadas regras de alocação que permitem uma geração menor de alternativas de manejo, resultando, em sua maioria, em perda de identidade das unidades de manejo. O modelo tipo II demanda menor esforço na formulação do problema, visto que é mais flexível, porém as unidades de manejo não são constantes no horizonte de planejamento, o que torna a sua implementação mais trabalhosa. Entretanto, no modelo tipo I, a floresta é subdividida em classes homogêneas de idades, o que difere do modelo tipo II, que tem unidades de manejo dentro do mesmo horizonte de planejamento (JOHNSON, SCHEUERMAN, 1977).

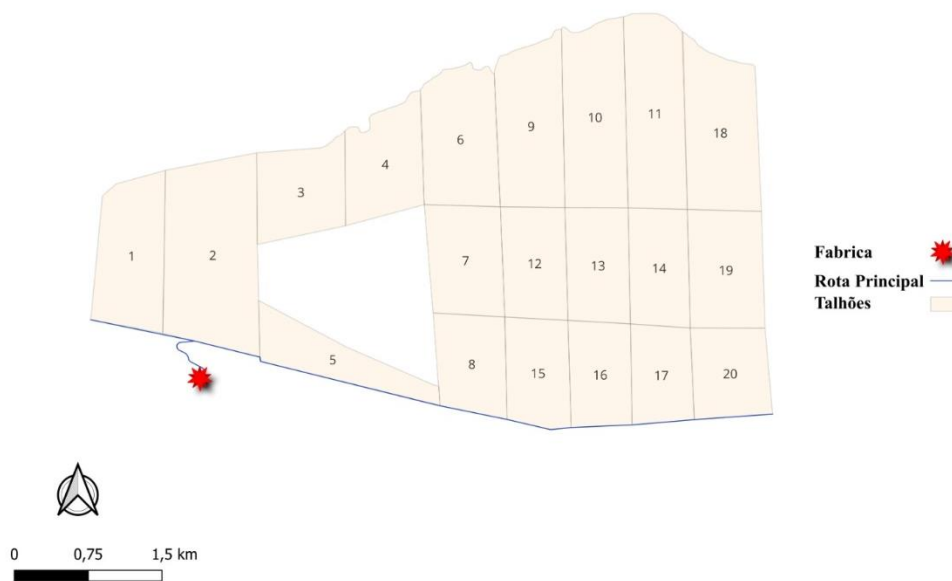
No meio florestal, a busca por melhorias é constante. Quando se trata de processos de otimização, alguns problemas apresentam um grau de dificuldade elevado (*NP-Hard*) por pertencerem a grupos de otimização combinatória e, nesses casos, a aplicação das metaheurísticas atingem um grau satisfatório de aplicação (GOMIDE, 2009). Rodrigues (2004) afirma que as heurísticas são algoritmos promissores para problemas de programação inteira, por fornecer soluções aceitáveis para problemas complexos e de grande porte, as meta-heurísticas que são as técnicas heurísticas mais sofisticadas, utiliza, por exemplo, do algoritmo genético para solucionar problemas como das pesquisas operacionais. Muitos problemas de planejamento florestal do tipo *NP-hard* apresentam soluções mais eficientes por meio dos algoritmos genéticos, por exemplo, as análises combinatórias de regulação florestal, problemas envolvendo talhões para colheita, seleção de rotas de transporte de madeira, corte de papel, dentre outros (RODRIGUES, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Base de dados

Para uma melhor visualização do modelo, foi considerada uma área de estudo de 1.115,73 hectares de plantio comercial de eucalipto distribuídos em 20 talhões, compreendida na região Centro-Oeste do Brasil, a estruturação do mapa e contabilização dos hectares foram feitos utilizando a versão mais atual do software QGIS 3.32 com a utilização do complemento QuickMapServices, sua visualização está compreendida na Figura 2.

Figura 2 – Mapa de localização dos talhões utilizados nas análises.



Fonte: Do autor (2023).

Para cada um dos talhões, foram estimadas as idades comerciais e simulada a produtividade de maneira randômica, compreendida entre 200 e 290 m³/ha. Posteriormente, foi realizada a conversão do volume para toneladas multiplicando o valor pela densidade do peso seco do eucalipto (0,5g/cm³) como nos estudos de Da Silva Oliveira (2005).

Para as definições logísticas, foram traçadas as rotas entre cada talhão e a fábrica, e calculadas as distâncias através do software QGIS. Assim, obteve-se uma malha de estradas com aproximadamente 89,19 km. Para fins de cálculo de deslocamento, foi adotada a velocidade média de 60 km/h e calculado o tempo de deslocamento considerando ida e volta, além do tempo constante de carregamento de 1h20.

Com o objetivo de integrar as viagens com o deslocamento de cargas, foram adotados a possibilidade de escolha entre dois veículos. Os veículos considerados foram o Bitrem articulado de 19,8 m, com capacidade de transportar um peso bruto total de 57 toneladas, e a carreta Tritrem de 30 m, com capacidade de transportar 74 toneladas (ALVES, 2013). Foram consideradas a disponibilidade de 17 e 15 veículos, respectivamente, de forma que atendessem aos critérios do modelo. É possível visualizar as informações de produção e logística através da tabela 1 e as opções de veículos apresentado na figura 3.

Tabela 1 – Distribuição da produtividade volumétrica e seu respectivo peso em biomassa, e as Informações vinculadas ao deslocamento do veículo florestal.

Talhão	Área	Idade	V(m ³ /ha)	Peso da madeira (ton/ha)	Peso total	Distância (km)	Carregamento + Deslocamento (h)
1	62,66	7,4	246,51	123,26	7723,23	1,17	1,24
2	109,61	6,2	289,10	144,55	15843,33	1,09	1,24
3	49,19	7,3	284,97	142,49	7008,74	2,72	1,29
4	50,86	6,0	266,57	133,29	6779,43	3,36	1,31
5	42,83	6,3	240,30	120,15	5146,51	2,57	1,29
6	64,24	6,2	263,68	131,84	8469,51	4,81	1,36
7	51,26	5,3	269,46	134,73	6906,36	3,89	1,33
8	42,90	5,0	247,79	123,89	5314,39	3,10	1,30
9	68,34	7,5	207,67	103,84	7096,50	5,32	1,38
10	72,88	5,7	259,28	129,64	9447,88	5,81	1,39
11	72,15	7,7	275,33	137,66	9931,81	7,88	1,46
12	45,31	7,3	200,29	100,15	4538,07	4,38	1,35
13	45,72	6,0	220,74	110,37	5046,20	4,87	1,36
14	44,39	6,5	220,23	110,12	4888,42	6,92	1,43
15	43,28	7,8	237,54	118,77	5140,43	3,61	1,32
16	40,88	5,0	290,24	145,12	5931,90	4,08	1,34
17	37,41	7,7	207,50	103,75	3881,02	4,57	1,35
18	72,84	7,4	251,38	125,69	9154,90	7,42	1,45
19	55,70	6,8	237,93	118,97	6626,36	6,46	1,42
20	43,28	7,3	278,55	139,27	6028,29	5,17	1,37
Total	1115,73				140903,30	89,19	

Fonte: Do Autor (2023).

Figura 3 – Composição do tipo de articulado adotado na simulação.



Fonte: Empresa Facchini (2023).

3.2 Modelo matemático de programação linear inteira mista

Para problemas de otimização, comumente são utilizados dados hipotéticos para a geração do modelo, com a formulação de um problema padrão são realizados testes e avaliado os cenários que apresentam características que mais se aproximam da realidade para o auxílio nas tomadas de decisões. O modelo matemático determinístico adotado assumiu que os dados coletados são confiáveis e que não apresentam nenhuma variação ou incerteza no momento da tomada de decisão, mesmo que esse apresente características voláteis como previsão de custos e demandas (SILVA, 2014).

O modelo foi desenvolvido com base na premissa de otimizar o suprimento de madeira, levando em consideração fatores como a capacidade máxima de toneladas por viagem, limitações de horas de trabalho e o tempo necessário para deslocamento. A matriz foi organizada em três partes distintas: a função objetivo, as variáveis e as restrições.

A função objetivo [1], de caráter multiobjetivo, tem o propósito de maximizar o volume a ser transportado ao longo do horizonte de planejamento, levando em consideração a soma do número de viagens necessárias para exaurir toda a madeira do talhão, bem como reduzir o número de viagens dos veículos. As variáveis assumidas foram x_{ij} , y_{ijk} e v_{ijk} . em que x na sua forma binária $\{0, 1\}$ representa a liberação da madeira no talhão i no período j . A variável y é variável de natureza contínua, e indica a quantidade de madeira a ser transportada em toneladas pelos veículos k no tempo j , cuja origem é o talhão i . Por fim, a variável v assume valor inteiro e representa o número de viagens necessárias para o transporte de madeira, cujos subíndices são iguais aos da variável y . A variável w desempenha um papel de penalidade para contabilizar os transportes de meia carga considerado em 5000 toneladas.

$$\text{Maximizar } Z = \sum_i^I \sum_j^{HP} v_{ij} x_{ij} - w \sum_i^I \sum_j^J \sum_K^K v_{ijk} \quad [1]$$

Essas variáveis desempenham papéis fundamentais na formulação e resolução do modelo. As restrições adotadas no modelo consideram os seguintes critérios:

- a) A quantidade de madeira disponível em cada talhão só pode ser deslocado uma única vez durante um dos três meses do horizonte de planejamento [2]:

$$\sum_j^{HP} x_{ij} = 1; \forall i \quad [2]$$

- b) O número de viagens realizadas deve ser suficiente para atender à demanda mínima de madeira que chega mensalmente no pátio [3]:

$$\sum_k^K \sum_i^I y_{ijk} \geq M1_j; \forall j \quad [3]$$

$$\sum_k^K \sum_i^I y_{ijk} \leq M2_j; \forall j$$

- c) O transporte deve considerar a exaustão do talhão, ou seja, todo o volume contido no talhão deve ser deslocado para a fábrica e, dessa forma, assume o valor de x para a exaustão do talhão [4]:

$$v_{ij} x_{ij} - \sum_k^K y_{ijk} = 0; \forall i; \forall j \quad [4]$$

- d) O número de viagens realizadas no mês deve assumir valor inteiro maior que zero, e deve determinar qual o veículo mais adequado para realizar os deslocamentos [5]:

$$cap_k v_{ijk} - y_{ijk} \geq 0; \forall i; \forall j; \forall k \quad [5]$$

- e) A última restrição complementa a anterior, pois, o número de viagens realizadas deve considerar o tempo de deslocamento da madeira respeitando o limite das horas trabalhadas H , que consistem em 2 turnos de 6 horas por 30 dias no mês, com um número limitado de veículos disponíveis [6]:

$$\sum_i^I h_{ijk} v_{ijk} \leq H_j; \forall j; \forall k \quad [6]$$

A formulação matemática caracteriza-se como um problema de otimização e foi desenvolvida por meio da criação de um modelo de Programação Linear Inteira Mista. Este modelo foi posteriormente resolvido utilizando o *solver* comercial Gurobi versão 9.5.1, pacote desenvolvido para utilização em Python, assim como nos estudos de Galvão (2022).

4 RESULTADOS

O modelo proposto obteve solução ótima para o cenário apresentado. No que diz respeito à liberação de madeira nos talhões, a variável de decisão x se apresentou na forma binária, permitindo apenas uma escolha entre os meses disponíveis para o transporte no horizonte de planejamento de três meses. A escolha do mês de transporte está diretamente relacionada às metas mínimas de demanda de madeira no pátio, sendo que para esse modelo foi estabelecido o limite inferior de 37.000 ton/mês e o limite superior de 52.000 ton/mês, enquanto a variável y fornece resultados contínuos dentro desses limites. Além disso, o modelo também forneceu soluções quanto a escolha do veículo mais adequado e o número de viagens requeridos pela variável v , considerando a restrição de capacidade de carga, sendo 57 toneladas para Bitrem e 74 toneladas para Tritrem. Todos os dados obtidos foram ajustados a limitação de horas de trabalho no mês, que consistem em 6 horas de 2 turnos, durante 30 dias no mês, que também levou em conta a disponibilidade dos veículos, 17 Bitrens e 15 Tritrens, todos escolhidos pelo modelo.

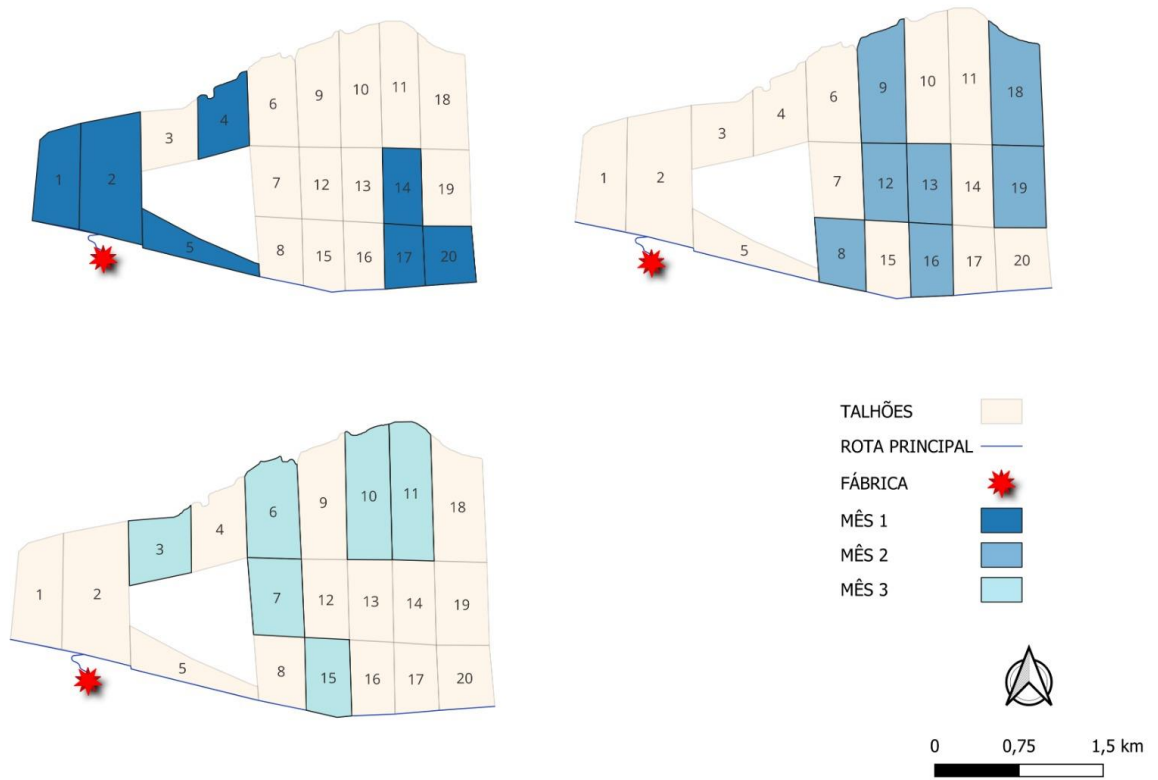
A solução obtida apresentou três agrupamentos de talhões para atender à demanda de madeira mínima ao longo dos três meses. No primeiro, um total de 7 talhões foram acessados para o transporte de madeira, com um peso total de 50.290,24 ton/mês distribuídas em 684 viagens. No segundo mês, foram necessárias 594 viagens para transportar um total de 43.708,32 ton/mês, distribuídas em 7 talhões. E no terceiro mês, foram realizadas 637 viagens para transportar 46.904,73 ton/mês, distribuídas em 6 talhões. Todas as viagens foram realizadas pelo veículo Tritrem, que foi a melhor opção de acordo com o modelo, respeitando o limite máximo de 5.400 horas por mês, já que na função objetivo não foi adicionado o custo da viagem, apenas seu número/veículo, além da escolha de agrupamentos de talhões próximos para otimização do tempo. Um maior detalhamento da solução ótima é observado na Tabela 2 e na Figura 4.

Tabela 2 – Solução ótima obtida para o transporte de madeira ao longo do horizonte de planejamento.

LIBERAÇÃO DA MADEIRA NOS TALHÕES				PESO MENSAL EM BIOMASSA LIBERADO (ton)			NÚMERO MENSAL DE VIAGENS					
							BITREM			TRITREM		
TALHÃO	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°
1	1	0	0	7.723,23	-	-	0	0	0	105	0	0
2	1	0	0	15.843,33	-	-	0	0	0	215	0	0
3	0	0	1	-	-	7.008,74	0	0	0	0	0	95
4	1	0	0	6.779,43	-	-	0	0	0	92	0	0
5	1	0	0	5.146,51	-	-	0	0	0	70	0	0
6	0	0	1	-	-	8.469,51	0	0	0	0	0	115
7	0	0	1	-	-	6.906,36	0	0	0	0	0	94
8	0	1	0	-	5.314,39	-	0	0	0	0	72	0
9	0	1	0	-	7.096,50	-	0	0	0	0	96	0
10	0	0	1	-	-	9.447,88	0	0	0	0	0	128
11	0	0	1	-	-	9.931,81	0	0	0	0	0	135
12	0	1	0	-	4.538,07	-	0	0	0	0	62	0
13	0	1	0	-	5.046,20	-	0	0	0	0	69	0
14	1	0	0	4.888,42	-	-	0	0	0	67	0	0
15	0	0	1	-	-	5.140,43	0	0	0	0	0	70
16	0	1	0	-	5.931,90	-	0	0	0	0	81	0
17	1	0	0	3.881,02	-	-	0	0	0	53	0	0
18	0	1	0	-	9.154,90	-	0	0	0	0	124	0
19	0	1	0	-	6.626,36	-	0	0	0	0	90	0
20	1	0	0	6.028,29	-	-	0	0	0	82	0	0
TOTAL	7	7	6	50.290,24	43.708,32	46.904,73	0	0	0	684	594	637

Fonte: Do Autor (2023).

Figura 4 – Espacialização da liberação de madeira mensalmente no Horizonte de planejamento do projeto.



Fonte: Do Autor (2023).

5 DISCUSSÃO

Ao analisar o modelo proposto de otimização para o transporte de madeira, é importante destacar que a resolução obtida é apenas um exemplo em microescala do que realmente pode ser aplicado nas empresas, uma vez que o modelo trabalhou com um banco de dados de apenas 20 talhões. A Programação Linear demonstra a capacidade de lidar com vários dados e possibilidade de resolução de maneira eficaz e simplificada, permitindo que as análises sejam realizadas até o encontro da solução ótima (LEUSCHNER, 1984).

O modelo determinístico parte da premissa de que os dados são confiáveis e permanecem constantes no momento da tomada de decisão, proporcionando respostas mais seguras em relação a dados. No entanto, essa abordagem não permite a antecipação de problemas que possam surgir, sendo necessária uma análise mais aprofundada na qual a natureza estocástica pode oferecer, pois, é uma metodologia que trabalha com problemas de otimização sob incertezas (ALEM, et al., 2015). Nesse caso, o modelo poderá ser reprocessado, reduzindo o volume de madeira já transportado, para garantir o seu real funcionamento e situações de atrasos ou imprevistos. Por outro lado, a natureza estocástica oferece uma amplitude e flexibilidade necessária para abordar as variações de cenários incertos, permitindo análises mais robustas para tomada de decisão. Portanto, a escolha entre os dois modelos depende das características do problema, e do grau de incerteza envolvido. Nesse cenário, a abordagem determinística desempenhou papel fundamental na otimização e na tomada de decisão.

Os resultados alcançados demonstraram consistências e confiabilidade ao aderir às restrições e gerenciar minuciosamente o número de viagens realizadas pelo transporte, assegurando o abastecimento de madeira dentro dos limites previamente estabelecidos. Isso evidencia que a técnica de Programação Linear é uma ferramenta versátil, que proporciona soluções confiáveis e eficientes no que diz respeito a decisões sobre o transporte de madeira. A utilização do *solver* Gurobi é, sem dúvida, um método altamente eficaz para encontrar soluções ótimas em problemas complexos de otimização, principalmente no que tange a eficiência de tempo, uma vez que para o processamento das informações do modelo o *solver* processou os resultados em aproximadamente 1 minuto. A ferramenta permite que as soluções encontradas estejam em conformidade com as restrições estabelecidas e otimize a função objetivo. Um próximo passo seria, após a consolidação, a geração de um pacote que construa o modelo de forma automática e que, ligado ao shine, gere um dashboard de controle dessa atividade.

É importante ressaltar que além de respeitadas as restrições, o agrupamento dos talhões dentro dos meses é realizado de forma que esses estejam próximos uns aos outros diminuindo as possibilidades de complicações quanto ao trajeto do veículo. No estudo de Monti; Gomide; Oliveira; França (2020) são discutidas questões que envolvem o deslocamento múltiplo e como ele é mais eficiente do que o deslocamento simples, o qual considera o deslocamento de um vértice do talhão até a fábrica. Os autores afirmam que o uso do modelo de deslocamento múltiplo auferirá melhor desempenho quando se movimentam de um talhão ao outro até atingir a capacidade total de carga, pois auxilia na redução do número de viagens, diminui o tempo utilizado pelo transporte mensalmente e, conseqüentemente, reduz os efeitos negativos no meio ambiente, além de reduzir os riscos de acidentes de trânsito. Portanto, esse tipo de modelo é eficaz e apresenta usabilidade para aplicação nos problemas que envolvem rotas de transporte.

O modelo estudado não apenas aprimora a alocação de recursos, mas também contribui para a eficiência operacional e o cumprimento das metas de demanda. A Programação Linear desempenha um papel fundamental na gestão eficaz da cadeia de suprimentos e na otimização do transporte de madeira. Sua aplicação continuará sendo relevante à medida que o setor florestal evolui e enfrenta novos desafios (SOUSA, 2015).

6 CONCLUSÃO

O modelo estudado demonstrou capacidade em encontrar a solução ótima para o problema apresentado. Apesar de ser um estudo de caso, esse modelo poderá servir como apoio nas tomadas de decisões em uma escala macro. Os resultados obtidos apresentaram consistência e confiabilidade, cumprindo com sucesso os critérios do modelo determinístico estabelecido. A utilização do *solver* Gurobi se mostrou altamente eficaz para obter soluções ótimas em problemas complexos de otimização, como os relacionados ao transporte e abastecimento de madeira.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. D; DE LANA, J. A. S; RIBEIRO, R. N. **Aplicação dos conceitos de Floresta 4.0 com a utilização de projeto de telemetria nas atividades de colheita florestal da CENIBRA**. Congresso Brasileiro de Instrumentação, Sistemas e Automação. Campinas: COBISA, 2019.
- AKAY, A. E. A new method of designing forest roads. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 28, n. 4, p. 273-279, 2004.
- ALEM, D; MORABITO, R. Planejamento da produção sob incerteza: programação estocástica versus otimização robusta. **Gestão & Produção**, v. 22, p. 539-551, 2015.
- ALMEIDA, P. R. O Brasil e a nanotecnologia: rumo à quarta revolução industrial. **Revista Espaço Acadêmico**, v. 5, 2005.
- ALVES, R. T. et al. Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares. **Revista Árvore**, v. 37, p. 897-904, 2013.
- BERGER, R. et al. Minimização de custos de transporte florestal com a utilização da Programação Linear. **Floresta**, v. 33, n. 1, 2003.
- BETTINGER, P; SESSIONS, J; BOSTON, K. A review of the status and use of validation procedures for heuristics used in forest planning. **Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences (MCFNS)**, v. 1, n. 1, p. 26-37 (12), 2009.
- BIREWAR, D. B. **Design, planning and scheduling of multiproduct batch plants**. Carnegie Mellon University, 1989.
- BOYLAND, M. **Hierarchy Planning in Forestry**. ATLAS. SIMFOR Project Technical Report, 2003.
- BRANDELERO, C; ANTUNES, M. U. F; GIOTTO, E. Silvicultura de precisão: nova tecnologia para o desenvolvimento. **Ambiência**, v. 3, n. 2, p. 269-281, 2007.
- CONCEIÇÃO, C. S. **Da Revolução Industrial à Revolução da Informação: uma análise evolucionária da industrialização da América Latina**. Programa de Pós Graduação em Economia Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.
- CORRÊA, C. M.C; MALINOVSKI, J. R; ROLOFF, G. Bases para planejamento de rede viária em reflorestamento no sul do Brasil. **Floresta**, v. 36, n. 2, 2006.
- COSTA, F. P. **Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral Ouro Preto, 2005.
- DA SILVA OLIVEIRA, J. T; HELLMEISTER, J. C; FILHO, M. T. VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE E DA DENSIDADE BÁSICA NA MADEIRA DE SETE ESPÉCIES DE EUCALIPTO. **Revista Árvore**, v. 1, n. 29, p. 115-127, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DER/SP). **Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais: Planejamento, projeto, construção e operação.** v1. São Paulo, 2012. Disponível em: < http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/manuais/Manual_Basico_de_Estradas_e_Rodovias_Vicinais-Volume_I.pdf >. Acesso em 16 ago.2023.

DRUCKER, P. O futuro já chegou. **Revista Exame**, v. 22, n. 03, 2000.

GALVAO, J.J.J. et al. **Problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultânea com dados encontrados em aplicativos de mapas.** PUC Goiás 2022.

GOMIDE, L. R. **Planejamento Florestal Espacial. 2009. 256 f.** Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) -Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2022.** 2022. Disponível em: < <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf> > Acesso em 22 ago.2023.

JOHNSON, K. N; SCHEURMAN, H. L. Técnicas para prescrever colheita ideal de madeira e investimento sob diferentes objetivos - Discussão e Síntese, **Forest Science**, v. 23, Edição suppl_1, 1977.

LEITE, A. M. P. **Análise dos fatores que afetam o desempenho de veículos e o custo de transporte de madeira no distrito florestal do Vale do Rio Doce, MG.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. 1992.

LEUSCHNER, W. A. **Introduction to forest resource management.** New York: John Wiley & Sons, 1984

LOPES, M. S. Floresta 4.0. **Mata Nativa**, 2021. Disponível em: < <https://matanativa.com.br/floresta-4-0/> >. Acesso em 27 mai,2023.

MACHADO, C C; LOPES, E.S. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário.** UFV, 2000.

MACHADO, C. C; SILVA, E. Planejamento de estradas florestais ambientalmente corretas. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL**, v. 5, p. 28-44, 2001.

MACHADO, C. C. Sistema brasileiro de classificação de estradas florestais (SIBRACEF): desenvolvimento e relação com o meio de transporte florestal rodoviário. **Curitiba: UFPR**, 1989.

MACHADO, C. C. **Transporte Florestal Rodoviário.** Viçosa: UFV. Impr. Univ. 1985. 38 p.

MAEDA, S. et al. Silvicultura de precisão. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.** p. 467-477, 2014.

MAINE DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION - MDEP. **Gravel Road maintenance manual: A guide for landowners on camp and other gravel roads**. 2016.

Disponível em:

<https://www.maine.gov/dep/land/watershed/camp/road/gravel_road_manual.pdf>. Acesso em: 15 ago, 2023.

MALINOVSKI, J. R. et al. Código de prática para estradas florestais. **Otacílio Costa: Malha Viária Logística de Estradas**, 2004.

MITCHELL, S. A. **Operational forest harvest scheduling optimisation: A mathematical model and solution strategy**. Tese de Doutorado. 2004.

MOBTAKER, A. et al. Integrated forest harvest planning and road-building model with consideration of economies of scale. **Canadian Journal of Forest Research**, v.50, p.989-1001, 2020.

MONTI, C.A.U; GOMIDE, L.R.; OLIVEIRA, R. M; FRANÇA, L.C.J. Optimization of Wood Supply: The Forestry Routing Optimization Model. **Anais da academia brasileira de ciências (online)**. v. 92, p. 1-17, 2020.

MORAES, A. C. **Classificação de estradas florestais e determinação de rota de transporte utilizando Sistema de Informação Geográfica**. Universidade Federal de Viçosa. 2014.

MORAES, C. R. B; FADEL, B. As Tecnologias da informação e a cultura organizacional: suas implicações no ambiente informacional das organizações. **IX Encontro de Pesquisadores do Uni-FACEF**, 2008.

MOREIRA, D. A. **Introdução à Administração da Produção e Operações**. São Paulo: Pioneira, 2008.

PRADO, D. **Programação Linear**. Município: Falconi Editora, 2016.

REVISTA OPINIÕES. Ribeirão Preto: Ed.WDS e VRDS,2020. ISSN 2177-6504.

Disponível em: < <https://florestal.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/leitura/online/o-avanco-da-tecnologia-no-novo-cenario-de-trabalho/> > Acesso em 8 out, 2023.

RODRIGUES, F. L. et al. Metaheurística algoritmo genético para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, v. 28, p. 233-245, 2004.

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. Universidade Federal de Viçosa. 2001.

RODRIGUES, F. L. et al. Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento. **Revista Árvore**, v. 30, p. 769-778, 2006.

RÖNNQVIST, M. et al. Operations research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, v. 232, p. 11-40, 2015.

SANCHES, B. C.; CARVALHO, E. S.; GOMES, F. F. B. A Indústria 4.0 e suas contribuições à sustentabilidade. **Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada-UNG-Ser**, v. 2, n. 1, p. 48-55, 2019.

SANTOS, B. P. et al. Indústria 4.0: desafios e oportunidades. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.

SEIXAS, F. **Uma metodologia de seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal de madeira**. Universidade de São Paulo USP.1992.

SHINZATO, E. T. et al. Priorização de operações de manutenção de estradas florestais por meio de indicadores hidrológicos. **Scientia Forestalis**, v. 51, p. 1-13, 2023.

SILVA, A. F; MARINS, F.A. S. **Revisão da literatura sobre modelos de Programação por Metas determinística e sob incerteza**. Production, v. 25, p. 92-112, 2014.

SILVA, R. C. **Planejamento e Projeto Agropecuário: Mapeamento e Estratégias Agrícolas**. Município: Saraiva Educação SA. 2014.

SILVERSIDES, A. P. Um estudo de tempo e produção na exploração de povoamentos jovens de Douglas-fir com motosserra e “Skidder”. **Revista Árvore**. 1978, p. 1-26.

Sousa, R. A. T. et al. Utilização de programação linear na análise do transporte principal de madeira. **Multitemas**, 2015.

ZIONTS, S. **Linear and integer programming**. Município: Prentice-Hall, 1974.