



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Especialização em Ciência de Dados



Modelagem matemática para o planejamento florestal de curto prazo de uma empresa do setor florestal

Aline Souza Andrade Bueno Américo

João Monlevade, MG
2024

Aline Souza Andrade Bueno Américo

**Modelagem matemática para o planejamento florestal de curto
prazo de uma empresa do setor florestal**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Ciência de Dados do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Especialista em Ciência de Dados.

Orientador: Prof. Dr. Paganini Barcellos de Oliveira

João Monlevade, MG

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A512m Americo, Aline Souza Andrade Bueno.

Modelagem matemática para o planejamento florestal de curto prazo de uma empresa do setor florestal. [manuscrito] / Aline Souza Andrade Bueno Americo. - 2024.

41 f.

Orientador: Prof. Dr. Paganini Barcellos de Oliveira.

Coorientadora: Dra. Aline Edwiges Mazon de Alcantara.

Produção Científica (Especialização). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Florestas - Planejamento. 2. Modelos matemáticos. 3. Planejamento empresarial. 4. Processo decisório. 5. Programação (Matemática). I. Oliveira, Paganini Barcellos de. II. Alcantara, Aline Edwiges Mazon de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 519.8

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Aline Souza Andrade Bueno Américo

Modelagem matemática para o planejamento florestal de curto prazo de uma empresa do setor florestal

Trabalho de conclusão de curso apresentado curso de Ciência de Dados da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Ciência de Dados

Aprovada em 05 de junho de 2024

Membros da banca

Doutor - Paganini Barcellos de Oliveira - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Alexandre Xavier Martins - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - Geraldo Magela Pereira Filho - CENIBRA (Celulose Nipo-Brasileira S.A.)

Paganini Barcellos de Oliveira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/06/2024



Documento assinado eletronicamente por **Paganini Barcellos de Oliveira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/06/2024, às 14:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0720442** e o código CRC **5AA5BE96**.

Resumo

O presente trabalho propõe a elaboração de um modelo de programação matemática capaz de representar algumas das decisões vinculadas ao planejamento operacional de curto prazo de uma empresa produtora de celulose. O escopo do modelo proposto abrange algumas etapas do processo de colheita (derrubada e baldeio), armazenagem e transporte de madeira, desde o local de derrubada até a unidade fabril. A função objetivo do modelo proposto tem como foco a minimização dos desvios relacionados às diferentes restrições do problema, considerando as metas e premissas operacionais estabelecidas pelos responsáveis pelo planejamento operacional. Os resultados computacionais mostraram que o modelo foi capaz de proporcionar soluções compatíveis com a realidade operacional da empresa, para um horizonte de 12 meses. Constatou-se que a alocação dos equipamentos de colheita (*harvesters*) nas frentes operacionais apresentaram uma variação média mensal de apenas 2% em relação com a metodologia adotada pela empresa nos dias atuais. Além disso, a solução do modelo matemático indicou que há espaços para redução nos custos de colheita, uma vez que, houve uma penalização menor para os diferentes tipos de acesso à colheita (estratégico, transição ou seco) em comparação com a metodologia atual.

Palavras-chaves: Planejamento florestal. Plano operacional de curto prazo. Modelagem matemática.

Abstract

This study proposes a mathematical programming model to represent some of the decisions related to the short-term planning of a pulp production company. The scope of the proposed model encompasses several stages of the harvesting process (cutting and forwarding), storage, and transportation of wood from the cut site to the manufacturing unit. The objective function of the proposed model focuses on minimizing deviations related to the different constraints of the problem, considering the goals and operational assumptions established by the operational planning managers. Computational results showed that the model was able to provide solutions compatible with the operational reality of the company for a 12-month horizon. The allocation of harvesters on operational fronts presented an average monthly variation of only 2% compared to the current methodology adopted by the company. Furthermore, the mathematical model solution indicated that it is possible to reduce harvesting costs, as there was less penalty for different types of harvesting access (strategic, transition, or dry) compared to the current methodology.

Keywords: Forest planning. Short-term operational plan. Mathematical modeling.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sequência de tomadas de decisão do problema	12
Figura 2 – Fluxo da madeira por talhão	15
Figura 3 – Demanda de colheita \times realizado pelo modelo	26
Figura 4 – Distribuição mensal da colheita para cada tipo de acesso por tipo acesso obtida pela pelo simulador da empresa	27
Figura 5 – Distribuição mensal da colheita para cada tipo de acesso por tipo acesso obtida pela solução ótima do modelo	28
Figura 6 – Penalidades mensais, em percentual (%), multiplicadas pelos pesos correspondentes e aplicadas às colheitas realizadas fora dos períodos considerados ideais	28
Figura 7 – Estoque de campo do mix que reúne as madeiras com casca e descascadas .	29
Figura 8 – Estoque de estrada do mix que reúne as madeiras com casca e descascadas .	29
Figura 9 – Estoque dos pátios intermediários do mix que reúne as madeiras com casca e descascadas	30
Figura 10 – Estoque de fábrica do mix que reúne as madeiras com casca e descascadas obtido pelo modelo matemático	30
Figura 11 – Estoque de fábrica do mix que reúne as madeiras com casca e descascadas obtido pelo simulador	30
Figura 12 – Alocação dos <i>harvesters</i> na frente operacional J_1 ao longo dos meses do ano	31
Figura 13 – Alocação dos <i>harvesters</i> na frente operacional J_2 ao longo dos meses do ano	32
Figura 14 – Alocação dos <i>harvesters</i> na frente operacional J_3 ao longo dos meses do ano	32
Figura 15 – Alocação dos <i>harvesters</i> na frente operacional J_4 ao longo dos meses do ano	32
Figura 16 – Alocação dos <i>harvesters</i> na frente operacional J_5 ao longo dos meses do ano	33
Figura 17 – Alocação dos <i>forwarders</i> e estoque de campo ao longo dos meses do ano . .	33

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de entrada vinculados à função objetivo do modelo matemático .	25
Tabela 2 – Volume percentual de derrubada e baldeio mensal em relação à demanda total	26
Tabela 3 – Prioridade estabelecida (ideal, baixa ou alta) para cada tipo de colheita (conjunto M do modelo) para cada mês do ano, em função das condições climáticas	27

Lista de quadros

Quadro 1 – Níveis de decisão da cadeia de suprimento florestal	5
Quadro 2 – Trabalhos abordando o planejamento operacional	8
Quadro 3 – Estrutura do modelo <i>Woodstock</i> no contexto do problema estudado	12
Quadro 4 – Caracterização dos conjuntos do modelo	16
Quadro 5 – Parâmetros utilizados para a construção do modelo	17
Quadro 6 – Caracterização das variáveis do modelo	18

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo geral	2
1.1.1	Objetivos específicos	2
1.2	Justificativa	3
1.3	Organização do trabalho	3
2	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	Planejamento florestal	4
2.2	Modelagem matemática e métodos de solução	6
3	METODOLOGIA	10
3.1	Classificação metodológica da pesquisa	10
3.2	Procedimentos metodológicos	10
4	DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA	14
4.1	Conjuntos, parâmetros e variáveis	16
4.2	Restrições	17
4.2.1	Volumes de colheita mínimo e máximo e total	18
4.2.2	Demanda mensal de transporte de madeira	19
4.2.3	Políticas de estoques	19
4.2.4	Disponibilidade de <i>harvester</i> e <i>forwader</i>	21
4.3	Função objetivo	22
4.4	Limitações e simplificações do problema real	22
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	24
5.1	Experimentos computacionais	24
5.1.1	Análise do volume de colheita de madeira	25
5.1.2	Análise dos estoques	29
5.1.3	Análise do uso dos equipamentos	31
5.1.4	Considerações adicionais em relação aos resultados obtidos	34
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
	REFERÊNCIAS	37

1 Introdução

O planejamento florestal tem como objetivo maximizar a utilização eficiente e sustentável dos recursos disponíveis para o manejo florestal, de forma a assegurar o fornecimento contínuo de madeira para as fábricas, considerando diferentes decisões vinculadas aos planos de curto, médio e longo prazo da organização (PIMENTEL; CEZANA, 2017). Um planejamento florestal bem elaborado, potencializa o processo de produção de madeira, impulsiona os retornos econômicos e fornece uma base para indústrias florestais sustentáveis (SANTAROSA; PENTEADO JÚNIOR; GOULART, 2014), requerendo assim abordagens inovadoras e utilização de tecnologias para otimização dos recursos.

As empresas que atuam no setor, buscam continuamente aperfeiçoar suas práticas de gestão e planejamento das operações florestais, abrangendo os diversos elos da cadeia de suprimentos, bem como restrições operacionais e sociais, de custo, e outras, vinculadas a fatores climáticos e incertezas associadas a cada ambiente de operação das empresas (RODRIGUES, 2001; BANHARA, 2009; JAROCHINSKI E SILVA, 2019). Um elemento-chave desse planejamento é o plano de abastecimento florestal, que compreende uma série de estratégias e ações planejadas para garantir o fornecimento sustentável dos recursos florestais. Esse plano é segmentado em diferentes horizontes temporais, que se difere com base na abordagem e objetivos, a começar pelo planejamento estratégico (longo prazo), seguido do planejamento tático (médio prazo), chegando ao planejamento operacional (curto prazo) (BETTINGER *et al.*, 2017).

O planejamento estratégico é caracterizado pelas decisões sobre os objetivos e estratégias da empresa (BANHARA, 2009). Já o planejamento tático tem como base os objetivos estabelecidos no planejamento estratégico, traduzidos para um âmbito mais específico, focado em ações para viabilizar o planejamento operacional (BANHARA, 2009). Este último, com um horizonte temporal mais curto, geralmente de 12 meses de planejamento, lida com a seleção das áreas a serem colhidas, a alocação de recursos, dimensionamento de pessoal e outras atividades operacionais (WERNEBURG, 2015).

Mais especificamente, em se tratando do planejamento florestal de curto prazo no ambiente foco deste estudo, pode-se dizer que as decisões operacionais se referem a um horizonte de tempo limitado, podendo compreender dias, semanas ou meses. Lopes (2016) destaca que as decisões de curto prazo estão relacionadas a produção de madeira (corte e baldeio), questões logísticas e financeiras, bem como às estratégias para o controle de estoques (campo, estrada e pátios intermediários), dimensionamento da demanda da fábrica e dos recursos físicos, silvicultura, capacidade produtiva, obras de infraestrutura de estradas, entre outros. Essas decisões, em geral, são tomadas dentro de um curto período de dias, considerando decisões de micro e macroplanejamento (LOPES, 2016).

Para abordar o problema de planejamento de curto prazo de maneira eficaz é importante considerar as restrições operacionais e trabalhar em colaboração com outras áreas da empresa, incluindo a produção e a logística, a fim de obter uma visão completa das necessidades e oportunidades do negócio (LOPES, 2016). Por outro lado, à medida que o plano de curto prazo se torna mais detalhado, aumenta-se tanto a complexidade do problema quanto a exigência por respostas mais rápidas (WERNEBURG, 2015).

Além disso, o plano de curto prazo pode ser comprometido/impactado por diferentes fatores que podem afetar a demanda da fábrica e a disponibilidade de madeira, levando o plano operacional a eventuais mudanças (PIMENTEL; CEZANA, 2017). Na empresa foco destes estudo, durante a vigência de um plano operacional ocorrem demandas de reprogramações que são avaliadas e efetivadas via um programa de simulação (planilha eletrônica acessada pelo software Microsoft Excel), elaborado com base na experiência dos planejadores e que considera os dois primeiros anos do plano de médio prazo.

Nesse contexto, considerando os desafios do planejamento florestal de curto prazo, o presente trabalho visa o desenvolvimento de um modelo de programação matemática capaz de auxiliar o planejamento operacional florestal de uma empresa produtora de celulose. Por se tratar de um problema que envolve uma série de questões operacionais, a ideia é que este estudo reúna algumas das variáveis, restrições e premissas que influenciam as operações florestais da empresa, com foco na minimização do total de atividades fora dos parâmetros operacionais desejáveis, dentro de um horizonte de 12 meses.

1.1 Objetivo geral

Este projeto objetiva o desenvolvimento de um modelo de programação matemática para representar um conjunto de decisões operacionais relacionadas com o planejamento florestal de curto prazo de uma empresa produtora de celulose, dentro do ambiente de codificação do software da Remsoft¹.

1.1.1 Objetivos específicos

- Descrever e caracterizar o planejamento florestal de curto prazo da empresa estudada, com destaque para as variáveis, restrições, limitações e simplificações que serão consideradas para a elaboração do modelo matemático.
- Modelar e codificar o problema por meio do software da Remsoft;
- Validar os resultados provenientes do modelo proposto a partir de comparações com a metodologia atualmente adotada pela empresa, utilizando dados reais.

¹ Plataforma de modelagem e otimização de problemas com foco em planejamento florestal. Disponível em: <<https://remsoft.com/>>. Acesso em: 03 fev. 2024.

1.2 Justificativa

Embora a integração entre os diferentes níveis de planejamento seja mencionada em diversas pesquisas relacionadas ao planejamento florestal, é percebido que o planejamento operacional com foco em questões de curto prazo (igual ou inferior a 12 meses) é menos explorado que os demais (tático e estratégico) na literatura, conforme observado por [Matos *et al.* \(2021\)](#). Tal situação pode estar associada ao fato dos problemas operacionais serem muito mais complexos ([DOS SANTOS *et al.*, 2019](#)), o que leva, na prática, ao uso de simuladores e planilhas de cálculo ([SANTOS, 2019](#)).

Esse contexto sugere que abordagens de otimização para um plano florestal de curto prazo se mostra uma tarefa desafiadora e que pode contribuir para a literatura sobre o assunto bem como auxiliar a empresa nos processos de tomadas de decisão, o que justifica a realização de estudos sobre a temática. Assim, a condução deste estudo se mostra uma oportunidade para desenvolver uma solução prática e que possa melhorar as técnicas de planejamento florestal, impulsionando a sustentabilidade operacional da empresa. Além disso, essa iniciativa oferece a possibilidade de aprimorar habilidades técnicas e analíticas da equipe responsável pelo planejamento florestal de curto prazo.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O Capítulo 1 se refere a uma breve introdução, de forma a contextualizar e apresentar o problema de pesquisa, bem como destacar os objetivos geral e específicos do estudo. O Capítulo 2 expõe a revisão de literatura utilizada como base para o desenvolvimento do estudo. O Capítulo 3 detalha a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, que inclui a descrição das etapas metodológicas da pesquisa e do plano experimental proposto para validação e avaliação do modelo matemático. O Capítulo 4 apresenta formalmente o problema, com destaque para suas particularidades e elementos-chave que serão considerados no modelo matemático proposto. O Capítulo 5 inicia apresentando as particularidades do ambiente computacional utilizado para execução dos testes computacionais, seguido pela descrição do processo de construção das instâncias e a apresentação dos resultados sumarizados da pesquisa. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e considerações finais do estudo, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

2.1 Planejamento florestal

O planejamento florestal pode ser definido como a identificação e sincronia entre atividades ao longo do tempo, para que seja possível alcançar os objetivos predefinidos dentro do manejo florestal (KANGAS *et al.*, 2015). Segundo Werneburg (2015), o planejamento tem o objetivo de auxiliar a administração, diante das mudanças no ambiente empresarial. Além de direcionar as responsabilidades e estabelecer ordem das operações nas diferentes áreas da empresa, o planejamento florestal tem o papel de traçar os objetivos com uma visão clara e torná-los aplicáveis, reduzindo assim as incertezas, esforços e recursos financeiros (MEGGINSON; MOSLEY; PIETRI JÚNIOR, 1988). As fases deste processo de decisões interdependentes devem ser conduzidas de forma consistente, garantindo a coerência entre as ações passadas e presentes, e incluindo uma análise das decisões e seus resultados, com o objetivo de nortear a empresa ao futuro desejado (MCDILL, 2014).

Augustynczik (2014) destaca que manejar a floresta sem o planejamento adequado, com base apenas em questões e condições imediatas, pode resultar em consequências indesejáveis. Nesse sentido, a elaboração de planos aderentes à execução é um dos maiores desafios para o processo de planejamento florestal (WERNEBURG, 2015). Assim, sua aplicabilidade prática se dá com o objetivo de assegurar a sustentabilidade do empreendimento, minimizar os custos, e considerar as restrições econômicas, ambientais, sociais, de logística e transporte, de demanda, de modais de colheita, de recursos e da política de estoque de madeira (WERNEBURG, 2015).

Para atendimento aos diferentes objetivos do planejamento florestal a literatura sobre o assunto apresenta uma divisão hierárquica em três níveis de decisão, estratégico, tático e operacional, em função do horizonte de tempo, longo, médio e curto prazo, respectivamente (MATOS *et al.*, 2021). O Quadro 1 sumariza as atividades desenvolvidas nos níveis de planejamento florestal e seus respectivos horizontes de planejamento.

O nível estratégico é caracterizado pela tomada de decisão sobre questões relacionadas à sustentabilidade do negócio, como a expansão da indústria ou grandes investimentos, por exemplo (BANHARA, 2009). O planejamento tático deve ser orientado para o processo de seleção de projetos para os próximos sete anos, reunindo ações focadas para viabilizar a colheita, como a construção de estradas, solução de restrições ambientais, sociais e operacionais, bem como ter alinhamento com o plano estratégico da organização (BANHARA, 2009).

Quadro 1 – Níveis de decisão da cadeia de suprimento florestal

Nível	Horizonte de planejamento	Manejo florestal e colheita	Transporte	Produção
Estratégico	21 anos	Plantio, estimativas de produção e de colheita de longo prazo	Planejamento dos acessos	Definição do plano de investimento
Tático	7 anos	Manutenção das florestas e definição do dimensionamento dos equipamentos	Construção de estradas e definição do dimensionamento dos equipamentos	Planejamento da produção anual
Operacional	Entre 12 e 18 meses	Dimensionamento das equipes e sequenciamento da colheita	Dimensionamento das equipes e sequenciamento do transporte	Dimensionamento dos lotes e agendamento da colheita e transporte

Fonte: Adaptada de Santos (2019, p. 21).

O planejamento operacional, foco desse estudo, contempla um horizonte de tempo de 12 a 18 meses e consiste na definição de uma sequência para as operações de colheita, considerando os projetos preestabelecidos no nível tático, visando o abastecimento da unidade fabril, o que inclui atividades como o dimensionamento de equipamentos e mão de obra, pátios intermediários, gestão de estoques, etc. (SANTOS, 2019).

Segundo Pimentel e Cezana (2017) o planejamento operacional envolve uma detalhada coordenação de atividades visando a melhor alocação dos recursos, o qual, a partir de uma demanda de consumo, são estabelecidas as metas de produção mensal, considerando a capacidade, recursos disponíveis e as restrições operacionais para um curto horizonte de tempo. A partir dessas definições são elaborados os planos de produção, determinando os cronogramas de produção, a alocação de equipamentos e mão de obra, e a definição de rotas de transporte com uma gestão colaborativa entre os setores/departamentos da organização a fim de otimizar o processo produtivo das operações florestais (DE CERQUEIRA FILHO, 2017).

Para resolução de questões relacionadas ao planejamento florestal de curto, médio e longo prazo, técnicas de otimização têm apresentado uma crescente utilização, uma vez que, ao longo dos últimos anos, esses problemas evoluíram em termos de diversidade e complexidade das decisões, resultando em demandas por modelos mais extensos e com restrições mais complexas (FRANÇA *et al.*, 2022). Essa tendência resulta em novos desafios para o setor florestal, especialmente em relação às novas demandas e à integração com as tecnologias existentes.

2.2 Modelagem matemática e métodos de solução

A modelagem matemática consiste no processo de representar, analisar e compreender fenômenos do mundo real usando técnicas estatísticas e algoritmos computacionais em problemas complexos para auxiliar nos processos de decisão (ARENALLES *et al.*, 2007). O modelo matemático permite projetar, planejar e operar sistemas em situações que requerem alocações eficientes de recursos escassos, com aplicação nas mais diversas áreas, que incluem a indústria, transportes, telecomunicações, finanças, saúde, serviços públicos, operações militares, etc. (ARENALLES *et al.*, 2007).

Os modelos de programação matemática são indicados para tratar problemas de otimização envolvendo restrições e de alocação ótima de recursos, contendo uma estrutura específica que compreende a definição da função objetivo, restrições e variáveis de decisão contínuas e/ou inteiras (BELFIORE; FÁVERO, 2013). O objetivo é determinar a solução ótima para o problema, por meio da maximização ou minimização da função objetivo, de modo atender todas as restrições do modelo (GONÇALVES, 2023).

Mais especificamente, em se tratando da aplicação de técnicas de otimização para os problemas de planejamento florestal de curto prazo, a literatura sobre o assunto ainda se mostra limitada (BELAVENUTTI; ROMERO; DIAZ-BALTEIRO, 2018), embora o emprego de técnicas avançadas de produção e planejamento esteja em plena ascensão no setor florestal. No âmbito da otimização de processos, a formulação de modelos matemáticos é destinada a encontrar a solução ótima para o problema. Por outro lado, sua aplicação em problemas complexos, caracterizados por múltiplas variáveis e restrições, torna desafiadora para a obtenção de uma solução ótima usando algoritmos exatos (ARAÚJO JÚNIOR *et al.*, 2017) e pode resultar em desafios computacionais significativos (FRANÇA *et al.*, 2022).

Diante dessa questão da complexidade computacional para a resolução dos problemas, é comum que algumas pesquisas recorram a técnicas heurísticas para encontrar boas soluções, próximas da ótima (YOSHIMOTO; ASANTE; KONOSHIMA, 2016). Essas abordagens, embora não garantam a solução ótima, têm sido aplicadas na resolução de problemas de grande escala e complexidade (AKBULUT *et al.*, 2017), combinadas, em alguns casos, com técnicas de simulação, onde se considera a expertise dos planejadores (KAYA *et al.*, 2016). Outra tendência é a combinação entre métodos clássicos e heurísticas no planejamento operacional (DOS SANTOS *et al.*, 2019; FRANÇA *et al.*, 2022).

De acordo com [Matos et al. \(2021\)](#), o planejamento florestal no âmbito estratégico é mais comum de ser abordado em trabalhos que utilizem técnicas de otimização baseadas em modelagem matemática, seguido do nível tático e operacional, respectivamente. Trabalhos abrangendo programação matemática no nível hierárquico de planejamento estratégico, por exemplo, normalmente envolvem problemas de seleção anual dos projetos para colheita, buscando a regulação florestal, com uma menor complexidade quando comparado o planejamento operacional ([DIAZ-BALTEIRO; BERTOMEU; BERTOMEU, 2009](#)).

Por outro lado, é possível encontrar alguns estudos na literatura que exploram métodos de otimização ou combinatórios para o planejamento operacional abordando tanto métodos exatos quanto aproximados, com diferentes funções objetivo e restrições, conforme descritos no Quadro 2.

Pelo Quadro 2 é possível notar que há diferenças no escopo dos estudos. Alguns trabalhos concentram-se em alguma atividade específica do planejamento operacional, como apresentado por [De Paula Júnior e Pereira \(1980\)](#), que busca otimizar a atividade de transporte, enquanto [Banhara \(2009\)](#) e [Matos \(2020\)](#) abordam a otimização da atividade de colheita. [Dos Santos \(2018\)](#) e [Santos \(2019\)](#) exploram a integração das atividades de colheita e transporte na modelagem matemática.

Ainda sobre o Quadro 2 observa-se a diferença nos horizontes de tempo, no âmbito do curto prazo, explorado em cada trabalho. [De Paula Júnior e Pereira \(1980\)](#) adota o horizonte de planejamento de 1 mês, [Banhara \(2009\)](#) considera o horizonte de 36 meses, [Dos Santos \(2018\)](#) limita-se ao horizonte de 15 dias, assim como [Santos \(2019\)](#) e [Matos \(2020\)](#) focam em um horizonte de 12 meses.

Outra diferença entre os estudos analisados está na quantidade de talhões ou áreas utilizadas como base de dados de entrada nas modelagens. [Dos Santos \(2018\)](#) empregou 50 talhões para os cenários elaborados, enquanto [Santos \(2019\)](#) utilizou 88 talhões. [Banhara \(2009\)](#) destaca que a área total considerada gira em torno de 5.000 hectares. [Matos \(2020\)](#) adota uma abordagem mais abrangente, com 431 talhões, totalizando cerca de 28.000 hectares. É de se esperar que, à medida que a quantidade de talhões e o tamanho das áreas aumentam, a complexidade do problema e a dificuldade de obtenção da solução ótima aumente, uma vez que um maior número de talhões resulta em mais alternativas de manejo e mais restrições.

Um aspecto relevante a se destacar é que nenhum dos estudos levantados é focado no mesmo objetivo do presente trabalho (ver última linha do Quadro 2), assim como existem diferenças em relação às restrições consideradas e o método de solução. No entanto, pode-se dizer que o escopo do trabalho de [Banhara \(2009\)](#) é aquele que mais se aproxima do presente estudo, seja para as restrições consideradas e pelo tipo de modelagem desenvolvida.

Quadro 2 – Trabalhos abordando o planejamento operacional

Autoria (ano)	Método	Função objetivo	Principais restrições
De Paula Júnior e Pereira (1980)	Modelagem matemática	Minimização do custo de transporte	Atendimento da demanda mínima da usina, tempo de carga e descarga dos caminhões
Banhara (2009)	Modelagem matemática	Maximização da receita líquida	Abastecimento, ambiental, capacidade operacional, colheita total do talhão, limite de corte e baldeio por equipe
Dos Santos (2018)	Meta-heurística	Minimização dos custos de colheita e transporte	Garantia que uma unidade produtiva seja colhida somente uma vez e por uma frente operacional, garantia do transporte mínimo conforme demanda
Santos (2019)	Modelagem matemática	Maximização do crescimento da floresta	Volume mensal médio de colheita e transporte, Estoque máximo de madeira nos pátios intermediários
Matos (2020)	Modelagem matemática	Minimização do deslocamento das frentes de colheita	Tempo disponível para operação, garantia que uma unidade produtiva seja colhida somente uma vez e por uma frente operacional
Autora (2024)*	Modelagem matemática	Minimização de atividades fora dos parâmetros desejáveis	Capacidade de colheita e transporte por frente operacional, equipamentos disponíveis para cada operação, demanda mensal de entrega por produto, atendimento à política de estoques, classificação dos projetos de colheita quanto ao período chuvoso

* Abordagem proposta neste trabalho.

A abordagem proposta neste trabalho é também conhecida na literatura como um modelo de Programação por Metas (SILVA; MARINS, 2014). Este tipo de modelo é utilizado para resolver problemas de decisão com um único ou múltiplos objetivos, que possuam restrições não rígidas e utilizem variáveis capazes de contabilizar os desvios das metas preestabelecidas. Cada objetivo é ponderado de acordo com sua importância, e o objetivo final é minimizar os desvios desses objetivos enquanto se satisfazem as restrições do problema.

3 Metodologia

3.1 Classificação metodológica da pesquisa

A proposta desse trabalho está baseada em uma abordagem de pesquisa quantitativa, devido à sua natureza aplicada que envolve a utilização de dados numéricos para a otimização de alguns dos processos vinculados ao planejamento florestal de curto prazo, via modelagem matemática (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018). Neste tipo de pesquisa é necessário estabelecer critérios de validação do modelo em função do problema real, sendo comum o uso de análises estatísticas para compreender e comparar as especificidades e relações entre variáveis do modelo quantitativo proposto (HAYATI; KARAMI; SLEE, 2006).

A abordagem quantitativa desse estudo pode ser classificada como empírico-descritiva, no tocante a tentativa de construção de um modelo que represente o problema real, com certo grau de simplificação, mas que também possui caráter normativo, quando se busca obter a melhor solução frente a diferentes instâncias baseadas em dados reais (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018). Segundo Gil (2022), a pesquisa empírica é descrita pela observação sistemática e análise de características concretas do problema, que, quando vinculado ao caráter descritivo busca representar as características de determinadas especificações do problema e que pode ser complementada pela prescrição de diferentes contextos projetados.

3.2 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos necessários para atender aos objetivos deste trabalho, incluindo a sequência das atividades necessárias para sua estruturação, levantamento de dados, desenvolvimento, validação e testes computacionais do modelo proposto, são descritos de forma sumarizada a seguir.

A primeira etapa metodológica se concentra em descrever e caracterizar o ambiente foco do estudo. Essa etapa inicial tem como foco identificar um conjunto de dados necessários para serem levantados para a construção do modelo matemático.

Para a coleta de dados deste estudo, foram levantados um conjunto de dados provenientes de diversos módulos do sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) utilizado pela empresa. As bases de dados incluem uma variedade de dados cadastrais, como área, idade da floresta e distância, referentes aos dois primeiros anos de colheita dos planos de médio prazo dos projetos selecionados. Ademais, foram considerados os dados de projeções de volume de cada unidade produtiva, estoques de madeira e demais dados correlacionados aos projetos.

Além dos dados extraídos do sistema ERP, também foram levantados e organizados em planilhas eletrônicas outros dados provenientes de fontes externas, como a inclinação das áreas, disponibilidade de máquinas, curva de rendimento, horas totais disponíveis para o uso destes equipamentos e a demanda mensal de madeira por produto.

Uma vez levantados os dados do problema, a etapa seguinte consiste na caracterização, estruturação e o estabelecimento do escopo do modelo proposto, para posterior descrição formal e codificado em linguagem matemática compatível com a ferramenta *Woodstock* disponíveis na plataforma da Remsoft. Essa etapa foi realizada em conjunto com equipe de planejamento da empresa, visando um alinhamento entre as partes interessadas, bem como poder utilizar do conhecimento técnico da equipe de trabalho para o estabelecimento de algumas característica-chave do modelo.

A formulação matemática proposta teve como base o modelo tipo II descrito no trabalho de [Johnson e Scheurman \(1977\)](#), caracterizando-se como um modelo de Programação Linear (LP). O processo da modelagem matemática inclui a seleção mensal das áreas para as atividades de derrubada, baldeio e transporte, a partir das alternativas de máquinas em cada frente operacional, relacionadas à cota anual de colheita para cada frente. É importante ressaltar, que ao construir o modelo matemático, algumas premissas e simplificações em relação ao problema real foram preestabelecidas.

Uma vez construído o modelo matemático, a etapa seguinte consiste na implementação deste modelo dentro do ambiente computacional da plataforma da Remsoft. O processo de modelagem computacional se inicia a partir da definição dos parâmetros de entrada e as variáveis de saída, seguido da indicação das restrições e da função objetivo do problema. Nesta fase da pesquisa foram estruturadas e parametrizadas as sessões de controle do modelo dentro da plataforma da Remsoft, que incluem:

1. **Áreas:** são inseridas as unidades de produção elegíveis do plano tático com suas respectivas áreas, frente operacional, idade, etc.;
2. **Yields:** são inseridos alguns parâmetros de entrada, como rendimentos dos equipamentos, horas disponíveis, projeções de volume, etc.;
3. **Árvore de decisão:** é uma representação estruturada das opções de ações ou decisões a serem tomadas para atingir os objetivos específicos da otimização ([COGSWELL; FEU-NEKES, 2000](#)), composta pelo recurso *Actions*, que parametriza todas as ações possíveis para cada unidade de produção e pelas *Transitions*, que definem os *status* resultantes para as unidades de produção após a aplicação das ações. A [Figura 1](#) ilustra a sequência de tomadas de decisão projetada para o problema;
4. **Outputs:** são definidas as variáveis do modelo, considerando os aspectos destacados no [Quadro 3](#);

Figura 1 – Sequência de tomadas de decisão do problema



- Legenda**
- aDER ação derrubada
 - aBAL ação baldeio
 - aTRP ação transporte pátio
 - aTRF ação transporte fábrica
 - EST estoque
 - SC sem casca
 - CC com casca

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 3 – Estrutura do modelo *Woodstock* no contexto do problema estudado

<i>Status inicial</i>	<i>Action</i>	<i>Transiction</i>	<i>Output</i>
Em Crescimento	Derrubada sem casca	Estoque de campo sem casca	Volume de madeira disponível para baldeio

Fonte: Elaborado pela autora.

5. **Optimize:** são descritas a função objetivo e as restrições necessárias para atingir o objetivo da otimização;
6. **Reports:** são disponibilizados os resultados das rodadas de otimização para posterior avaliação.

A representação gráfica da árvore de decisão (ver Figura 1) ilustra a estrutura de decisão do modelo proposto para o problema de planejamento em estudo. Cada seta na figura representa uma opção de decisão, sinalizado pelas ações destacadas em amarelo. Essas ações conduzem às transições, sinalizadas em verde e azul, que representam as consequências ou mudanças de estado. Os *outputs*, como exemplificado no Quadro 3, são os resultados ou valores obtidos após a efetivação das ações e transições.

Uma vez implementado o modelo no ambiente computacional, as etapas subsequentes tem como foco a validação, análise e comparação dos resultados com o cenário real. O solver comercial do Gurobi² foi utilizado dentro da plataforma da Remsoft para a obtenção da solução ótima do problema.

Um conjunto de testes preliminares foi realizado, de forma empírica, visando estabelecer o valor de alguns parâmetros relevantes para o modelo. Esses testes tinham como foco ajustar alguns dos parâmetros do modelo, em especial os pesos atribuídos à cada uma das restrições do problema, visando assegurar maior grau de consistência e compatibilidade entre as tomadas de decisão e as condições reais em operação da empresa.

Os procedimentos de validação foram realizados por meio de comparações das saídas do modelo com alguns indicadores monitorados pela empresa, que, por sua vez são realizados por meio do uso de planilhas eletrônicas e um simulador. Entre os indicadores de desempenho avaliados pode-se citar o volume de produção de madeira em metros cúbicos (m^3), o sortimento da madeira, a alocação dos recursos, a quantidade de máquinas para cada operação e o rendimento médio de cada operação em metros cúbicos por hora (m^3/h), distribuídos ao longo dos meses no horizonte de planejamento avaliado.

Por fim, as análises e conclusões obtidas foram organizadas e reportadas, com foco na identificação de padrões e diferenças entre os resultados do modelo e do simulador. Tais resultados foram importantes para apontar questões futuras a serem implementadas para o aprimoramento do modelo matemático, visando torná-lo mais alinhado com as necessidades operacionais da empresa.

² Resolvedor comercial de problemas de programação inteira mista da empresa Gurobi Optimization. Disponível em: <<http://www.gurobi.com>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

4 Descrição e modelagem do problema

O problema de agendamento da colheita de madeira tem como objetivo encontrar a forma mais eficiente, do ponto de vista econômico, para colher um mosaico de talhões distribuídos pela floresta (AUGUSTYNCZIK, 2014). O termo talhão é definido por Werneburg (2015) como uma unidade de área delimitada para fins de manejo e gestão florestal, e, geralmente, consiste em uma área contígua da floresta que é gerenciada como uma unidade única.

A divisão em talhões, tal como na empresa foco deste estudo, permite o planejamento e a execução de atividades, como colheita da madeira, plantio de mudas, monitoramento florestal e avaliação de impactos ambientais (WERNEBURG, 2015). Assim, o problema de planejamento da colheita florestal envolve determinar quando, onde e quanto será colhido nos diferentes períodos do horizonte de planejamento, as estimativas de produção de madeira de cada talhão e a demanda da fábrica que é a premissa para a produção anual de madeira (MARQUES *et al.*, 2014).

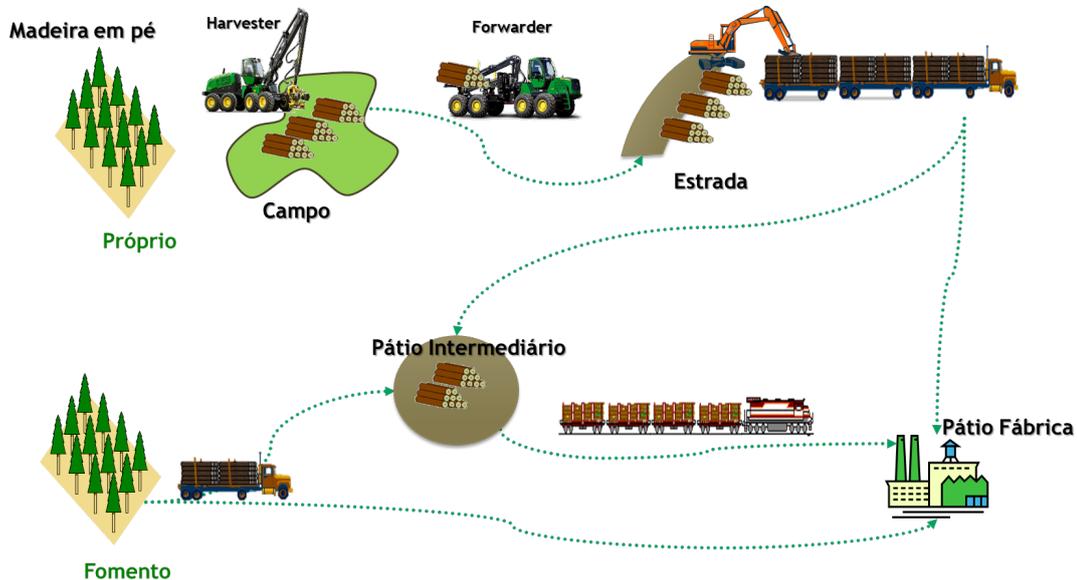
Para o ambiente em estudo, o grande desafio do planejamento operacional é estabelecer o melhor período de colheita para cada um dos talhões, conforme suas características, conciliado com a disponibilidade dos recursos (máquinas, equipamentos, etc.) em cada período. Segundo Marques *et al.* (2014), as decisões relacionadas ao planejamento da colheita florestal dependem de uma série de fatores e restrições, como a disponibilidade de recursos e mão e obra, condições climáticas, distâncias de deslocamento, capacidade de produção, custos e regulamentações.

Mais especificamente, no planejamento de curto prazo da empresa, há um conjunto de decisões paralelas e outras sequenciais que ocorrem ao longo de um horizonte de planejamento da colheita dos talhões, que incluem, por exemplo, dados sobre a época de colheita, a época de transporte e o tipo de madeira a produzir por talhão. As diferentes combinações dessas decisões e a interdependência delas criam uma infinidade de alternativas no planejamento. O número total de alternativas de manejo geradas para o problema depende de fatores como o número de talhões, estrutura dos povoamentos (idades, espécies, regime de manejo) os usos da madeira pela fábrica e disponibilidade de locais para estoque, entre outros diversos fatores.

Machado e Lopes (2014) definem que o fluxo da madeira no processo florestal como um ciclo contínuo que se inicia a partir da identificação de uma floresta madura, seguido pelos processos de derrubada e baldeio por sortimento (com casca, descascada, energia), transporte e finalmente o estoque, para posterior utilização na indústria. Neste ciclo, há dois tipos de controle do estoque, um associado à derrubada, o estoque de campo, e outro vinculado ao baldeio, o estoque de estrada, ambos limitados em função do espaço físico, bem como a disponibilidade e o rendimento médio de operação dos equipamentos em cada atividade (BANHARA, 2009).

A Figura 2 ilustra o cenário geral do fluxo da madeira, por talhão, desde a floresta em pé, até a entrega da madeira à fábrica de celulose deste estudo.

Figura 2 – Fluxo da madeira por talhão



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme ilustrado na Figura 2 e destacado por Lopes (2017), as atividades de derrubada e baldeio são realizadas pelo *harvester* e *forwarder*, respectivamente. O *harvester* executa a operação de corte, ou seja, se trata do equipamento utilizado na derrubada, que também estabelece o direcionamento de queda da árvore, o processamento de galhada, o descascamento, o traçamento e posicionamento das toras em feixes, que, na sequência, são extraídos pelo *forwarder* (LOPES, 2017). O *forwarder* realiza o deslocamento e empilhamento dos feixes de toras espalhados pelo talhão e os leva até a beira da estrada (LOPES, 2017).

A madeira localizada à beira da estrada é transportada para os pátios intermediários ou diretamente para a fábrica. As etapas de transporte podem ser feitas via modal rodoviário ou ferroviário a depender das características das frentes operacionais. A empresa foco deste estudo utiliza-se, além do abastecimento com madeira própria, da entrega de madeira por terceiros, que é acompanhada por meio de um sistema integrado de gestão logística. O dimensionamento do transporte é realizado com base na demanda e na capacidade de recebimento dos pátios intermediários e da fábrica.

O modelo matemático desenvolvido neste estudo, oferece uma abordagem abrangente para os desafios associados ao planejamento operacional florestal. Ao abordar a otimização das atividades de colheita, baldeio e movimentação de madeira para os estoques, o modelo leva em consideração algumas das restrições operacionais do problema real.

O modelo proposto visa encontrar a melhor estratégia de manejo para cada talhão, considerando não apenas as variáveis temporais, mas também as operacionais que impactam a viabilidade prática das decisões. Ao integrar esses elementos, a ideia é que o resultado do modelo possa contribuir no processo de alocação dos recursos em um período de 12 meses.

Além disso, no modelo proposto os dados de entrada estão agrupados em níveis hierárquicos (talhão, frente operacional, etc.), sendo o talhão a menor unidade de produção, somando um total de 7000 unidades. Por outro lado, para este estudo são considerados os talhões referentes apenas aos dois primeiros anos de colheita contemplados no plano tático.

4.1 Conjuntos, parâmetros e variáveis

O Quadro 4 resume os conjuntos utilizados no modelo proposto. Cada conjunto representa uma categoria dos elementos envolvidos na modelagem, abrangendo desde os períodos de tempo, frentes operacionais, restrições e tipos de estoques, até os diferentes tipos de madeira, inclinações de terreno e formas de colheita.

Quadro 4 – Caracterização dos conjuntos do modelo

Conjunto	Descrição
I	Talhões, sendo um i para cada talhão.
J	Frentes operacionais, sendo um j para cada frente operacional vinculada a uma região.
K	Tipos de madeira, sendo um k para cada tipo de madeira (com casca - 1, descascado - 2 e energia - 3).
L	Locais para estoque de madeira, sendo um l para cada tipo de estoque (campo - 1, estrada - 2, pátios - 3 e fábrica - 4).
M	Tipo de colheita, sendo um m para cada tipo de colheita (estratégico - 1, transição - 2 e seco - 3).
N	Restrições do problema, sendo um n por restrição que pode penalizar a função objetivo.
R	Tipo de inclinação, sendo um r para cada tipo de inclinação (padrão - 1, guincho work - 2 e colheita especial - 3).
T	Períodos de planejamento, sendo um t para cada mês.

O Quadro 5 detalha os parâmetros de entrada fornecidos como *input* na construção do modelo proposto. Esses parâmetros são fundamentais para a formulação e resolução do problema e se vinculam a um ou mais conjuntos definidos no Quadro 4.

Note que os parâmetros fornecem informações sobre a produtividade da floresta, horas disponíveis para a operação de cada equipamento, rendimentos operacionais e inclinação dos talhões para diferentes tipos de colheita, por exemplo. Por fim, o Quadro 6 apresenta as variáveis utilizadas no modelo e expressam as decisões a serem tomadas a fim de resolver o problema em estudo.

Quadro 5 – Parâmetros utilizados para a construção do modelo

Parâmetro	Descrição
α_{ij}	Área total de cada de cada talhão $i \in I$, em hectare (ha), de uma frente operacional $j \in J$.
κ_{ij}	Produtividade média estimada de floresta (m ³ /ha), para cada talhão $i \in I$ de uma frente operacional $j \in J$.
Ψ_{ijr}	Percentual de área com inclinação $r \in R$ de cada talhão $i \in I$ de uma frente operacional $j \in J$.
λ_{ijkrt}	Rendimento operacional (m ³ /h), relacionado ao volume de madeira do tipo $k \in K$ derrubada por um <i>harvester</i> operando em um talhão $i \in I$ com inclinação $r \in R$, pertencente a uma frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
σ_{ijkrt}	Rendimento operacional (m ³ /h), relacionado ao volume de madeira processada do tipo $k \in K$ por um <i>forwarder</i> operando em um talhão $i \in I$ com inclinação $r \in R$, pertencente a uma frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
Υ_{jt}	Total de horas disponíveis para operação de derrubada via <i>harvesters</i> na frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
τ_{jt}	Total de horas disponíveis para operação de baldeio via <i>forwarders</i> na frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
θ_{jkt}	Demanda total de um tipo de madeira $k \in K$ de uma frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
Θ_k	Demanda total de um tipo de madeira $k \in K$ no ano.
$[\Phi]_{jkm}$	Volume mínimo de colheita do tipo $m \in M$ (m ³) para cada tipo de madeira $k \in K$ de uma frente operacional $j \in J$ em um horizonte de planejamento $t \in T$.
$[\Phi]_{jkm}$	Volume máximo de colheita do tipo $m \in M$ (m ³) para cada tipo de madeira $k \in K$ de uma frente operacional $j \in J$ em um horizonte de planejamento $t \in T$.
$[\phi]_{jkl}$	Estoque mínimo de cada localidade $l \in L$, tal que $l \leq 2$, para armazenagem de madeira $k \in K$, vinculado a uma frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
$[\phi]_{jkl}$	Estoque máximo de cada localidade $l \in L$, tal que $l \leq 2$, para armazenagem de madeira $k \in K$, vinculado a uma frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
$[\gamma]_{jkt}$	Estoque de pátio intermediário mínimo de cada tipo de madeira $k \in K$ de uma frente operacional $j \in J$, no período $t \in T$.
$[\gamma]_{jkt}$	Estoque de pátio intermediário máximo de cada tipo de madeira $k \in K$ de uma frente operacional $j \in J$, no período $t \in T$.
$[\delta]_{kt}$	Estoque de fábrica mínimo de cada tipo de madeira $k \in K$ no período $t \in T$.
$[\delta]_{kt}$	Estoque de fábrica máximo de cada tipo de madeira $k \in K$ no período $t \in T$.
ε_{jkl1}	Estoque inicial de madeira do tipo $k \in K$ no local $l \in L$, tal que $l \leq 3$, vinculado à frente operacional $j \in J$ no período $t = 1$.
v_{jk1}	Estoque inicial de madeira do tipo $k \in K$ nos pátios intermediários advindos de uma frente operacional $j \in J$ no período $t = 1$.
ζ_{k1}	Estoque inicial de madeira do tipo $k \in K$ na fábrica no período $t = 1$.
β_{jkl}	Volume mínimo de transporte de madeira do tipo $k \in K$, pertencente a uma frente operacional $j \in J$ que deve ser levado para um local $l \in L$, tal que $l \geq 3$, no período $t \in T$.
μ_{kt}	Consumo mensal da fábrica, em metros cúbicos (m ³), de cada tipo de madeira $k \in K$ no período $t \in T$.
Δ_{jt}	Percentual de variação do uso dos <i>harvesters</i> , para mais ou para menos, entre os períodos de tempo $t \in T$, tal que $t \geq 2$, em cada frente operacional $j \in J$.
ρ_n	Peso atribuído à cada uma das restrições $n \in N$ do problema, que podem penalizar a função objetivo do problema, considerando as prioridades preestabelecidas pela empresa.
ω_n	Fator de conversão em reais (R\$) de cada uma das variáveis $w_n \mid n \in N$, do problema.

4.2 Restrições

As restrições operacionais de um planejamento florestal de curto prazo se referem às limitações ou condições que afetam as atividades de colheita e transporte, podendo ser incluídas também restrições ambientais, sociais, climáticas, entre outras (WERNEBURG, 2015), conforme os objetivos e os recursos disponíveis de cada empreendimento (SANTOS, 2019).

Quadro 6 – Caracterização das variáveis do modelo

Variáveis	Descrição
$x_{ijkmrt} \geq 0$	Volume de madeira derrubada (m ³) do tipo $k \in K$, colhida pelo tipo processo $m \in M$ e padrão de inclinação $r \in R$, em cada talhão $i \in I$ de uma frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
$y_{ijkrt} \geq 0$	Volume de madeira do tipo $k \in K$ que passou pela atividade de baldeio no talhão $i \in I$ com padrão de inclinação $r \in R$, pertencente à frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
$z_{jkl} \geq 0$	Volume de madeira do tipo $k \in K$ vinculada à frente operacional $j \in J$ e que foi transportado para o local $l \in L$, tal que $l \geq 3$, no período $t \in T$.
$e_{ijklrt} \geq 0$	Estoque inicial de madeira do tipo $k \in K$ no local $l \in L$, tal que $l \leq 2$, vinculado à um talhão $i \in I$, com inclinação $r \in R$, de uma frente operacional $j \in J$ para cada período $t \in T$.
$v_{jkt} \geq 0$	Estoque inicial de madeira do tipo $k \in K$ nos pátios intermediários advindos de uma frente operacional $j \in J$ em período $t \in T$.
$s_{kt} \geq 0$	Estoque inicial de madeira do tipo $k \in K$ na fábrica em cada período $t \in T$.
$h_{ijkrt} \geq 0$	Horas de colheita de madeira do tipo $k \in K$ pelos <i>harvesters</i> operando no talhão $i \in I$, com inclinação $r \in R$, pertencente a uma frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
$f_{ijkrt} \geq 0$	Horas de baldeio de madeira do tipo $k \in K$ pelos <i>forwarders</i> operando no talhão $i \in I$, com inclinação $r \in R$, pertencente a uma frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.
$w_n \geq 0$	Cálculo da folga associada à cada uma das restrições $n \in N$ do problema que possuem vínculo com a função objetivo.

Neste trabalho, as restrições foram agrupadas em questões de volume de colheita, demanda de transporte, políticas de estoques e disponibilidade de equipamentos para colheita e baldeio, conforme apresentado na sequência.

4.2.1 Volumes de colheita mínimo e máximo e total

A fim de evitar grandes oscilações no uso dos equipamentos e na mão de obra empregada, são definidos os volumes, mínimo, máximo e total de colheita de cada tipo de madeira $k \in K$ oriundos de uma frente operacional $j \in J$, em cada período $t \in T$, conforme mostrado nas restrições (1) à (3), respectivamente. Há também restrições que estabelecem uma meta de produção de cada tipo de madeira $k \in K$ no ano, tal como mostrado nas restrições (4).

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R} x_{ijkmrt} + w_{n_{(\lfloor \Phi \rfloor)_{jkm t}}} = \lfloor \Phi \rfloor_{jkm t} \quad \forall j \in J, k \in K, m \in M, t \in T, n_{(\lfloor \Phi \rfloor)_{jkm t}} \in N \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R} x_{ijkmrt} - w_{n_{(\lceil \Phi \rceil)_{jkm t}}} = \lceil \Phi \rceil_{jkm t} \quad \forall j \in J, k \in K, m \in M, t \in T, n_{(\lceil \Phi \rceil)_{jkm t}} \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R} x_{ijkmrt} + w_{n_{(\theta)_{jkt}}} = \theta_{jkt} \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T, n_{(\theta)_{jkt}} \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{ijkmrt} + w_{n_{(\Theta_k)}} = \Theta_k \quad \forall k \in K, n_{(\Theta_k)} \in N \quad (4)$$

As restrições são (1) e (2) são desagregadas por tipo de colheita $m \in M$, diferentemente do cálculo do volume total preestabelecido. Além disso, caso o volume colhido seja inferior aos valores preestabelecidos para uma ou mais das restrições (1)-(3), uma variável w_n irá absorver esse volume não atendido e penalizar a função objetivo. Nas restrições (4), o parâmetro Θ_k foi adotado para simplificar a notação, uma vez que, o valor do parâmetro é $\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \theta_{jkt} = \Theta_k$, para todo $k \in K$.

Uma particularidade a se destacar em relação às restrições (1) e (2), diz respeito ao estabelecimento de priorização da colheita em função das condições climáticas, cujos valores $\lfloor \Phi \rfloor_{jkm} = \lceil \Phi \rceil_{jkm} = 0$ para alguns meses em específico, onde se deve priorizar a colheita de um único tipo projeto $m \in M$, para todos os tipos de madeira $k \in K$ das frentes operacionais $j \in J$. Como exemplo, do quarto ($t = 4$) ao nono ($t = 9$) mês é o período de colheita seco ($m = 3$), caso seja feita alguma colheita estratégica ($m = 1$) nesses meses, a função objetivo será penalizada ($w_{n(\lfloor \Phi \rfloor_{jkm})} \wedge w_{n(\lceil \Phi \rceil_{jkm})} > 0$).

4.2.2 Demanda mensal de transporte de madeira

A demanda mensal de entrega de madeira se refere ao consumo de madeira pela indústria e também uma parte que será armazenada como reserva de material para cada tipo de madeira. As restrições (5) indicam o volume de madeira de cada tipo $k \in K$, que deve ser transportado de cada frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$.

$$z_{jkl} + w_{n(\beta_{jkl})} = \beta_{jkl} \quad \forall j \in J, k \in K, l \in L \mid l \geq 3, t \in T, n(\beta_{jkl}) \in N \quad (5)$$

Note que, embora não se tenha inserido um conjunto de restrições para questões de capacidade de transporte no modelo, é importante ter em mente que é necessário o dimensionamento de veículos de carga disponíveis para realização do transporte da madeira, o que inclui as informações de densidade básica (DB) de madeira e relação peso volume (RPV) (WERNEBURG, 2015).

4.2.3 Políticas de estoques

Políticas de estoques se referem às estratégias e diretrizes da empresa para gerenciar os níveis ideais de estoques, garantindo o suprimento de madeira para a unidade consumidora no tempo e locais corretos, por meio de processos de planejamento, execução e controles (DOS SANTOS, 2008).

Neste contexto, as restrições apresentadas a seguir representam os quatro níveis de estoque destacados na Figura 2, isto é, estoques de campo, de estrada, de pátio intermediário e de fábrica. As restrições (6) a (8) mostram quais são os estoques iniciais, para o primeiro mês ($t = 1$), em cada localidade.

$$e_{jkl} = \varepsilon_{jkl} \quad \forall j \in J, k \in K, l \in L \mid l \leq 2 \quad (6)$$

$$v_{jk1} = \nu_{jk1} \quad \forall j \in J, k \in K \quad (7)$$

$$s_{k1} = \zeta_{k1} \quad \forall k \in K. \quad (8)$$

De forma complementar, as restrições (9) a (12) mostram como é feito o cálculo dos estoques de campo, estradas, pátio e fábrica, respectivamente, a partir do segundo mês ($t > 2$).

$$e_{ijk1rt} = e_{ijk1r(t-1)} - y_{ijkrt} + \sum_{m \in M} x_{ijkmrt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, r \in R, t \in T \mid t > 2 \quad (9)$$

$$e_{ijk2rt} = e_{ijk2r(t-1)} + y_{ijkrt} - z_{jk3t} - z_{jk4t} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, r \in R, t \in T \mid t > 2 \quad (10)$$

$$v_{jkt} = v_{jk(t-1)} + z_{jk3t} - z_{jk4t} \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T \mid t > 2 \quad (11)$$

$$s_{kt} = s_{k(t-1)} + \sum_{j \in J} z_{jk4t} - \mu_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \mid t > 2. \quad (12)$$

Conforme política interna da empresa, há valores mínimos e máximos de estoque que devem ser respeitados, para cada uma das localidades. Caso esses valores não sejam respeitados, deve-se penalizar a função objetivo. As restrições (13) a (16) mostram como são tratados os volumes mínimos de estoque, em função da colheita, baldeio e o transporte (pátio e fábrica) dos estoques de campo, estradas, pátio e fábrica, respectivamente.

$$e_{ijk1rt} - y_{ijkrt} + \sum_{m \in M} x_{ijkmrt} + w_{n_{(\lfloor \phi \rfloor_{jk1t})}} = \lfloor \phi \rfloor_{jk1t} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, r \in R, t \in T, n_{(\lfloor \phi \rfloor_{jk1t})} \in N \quad (13)$$

$$e_{ijk2rt} + y_{ijkrt} - z_{jk3t} - z_{jk4t} + w_{n_{(\lfloor \phi \rfloor_{jk2t})}} = \lfloor \phi \rfloor_{jk2t} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, r \in R, t \in T, n_{(\lfloor \phi \rfloor_{jk2t})} \in N \quad (14)$$

$$v_{jk3t} + z_{jk3t} - z_{jk4t} + w_{n_{(\lfloor \gamma \rfloor_{jkt})}} = \lfloor \gamma \rfloor_{jkt} \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T, n_{(\lfloor \gamma \rfloor_{jkt})} \in N \quad (15)$$

$$s_{kt} + \sum_{j \in J} z_{jk4t} - \mu_{kt} + w_{n_{(\lfloor \delta \rfloor_{kt})}} = \lfloor \delta \rfloor_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T, n_{(\lfloor \delta \rfloor_{kt})} \in N. \quad (16)$$

De forma similar às restrições (13) a (16), porém em relação aos limites máximos de estoque em cada localidade, as restrições (17) a (20), respectivamente, são responsáveis por cumprir este papel no modelo.

$$e_{ijk1rt} - y_{ijkrt} + \sum_{m \in M} x_{ijkmrt} - w_{n_{(\lceil \phi \rceil_{jk1t})}} = \lceil \phi \rceil_{jk1t} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, r \in R, t \in T, n_{(\lceil \phi \rceil_{jk1t})} \in N \quad (17)$$

$$e_{ijk2rt} + y_{ijkrt} - z_{jk3t} - z_{jk4t} - w_{n_{(\lceil \phi \rceil_{jk2t})}} = \lceil \phi \rceil_{jk2t} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, r \in R, t \in T, n_{(\lceil \phi \rceil_{jk2t})} \in N \quad (18)$$

$$v_{jkt} + z_{jk3t} - z_{jk4t} - w_{n_{(\lceil \gamma \rceil_{jkt})}} = \lceil \gamma \rceil_{jkt} \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T, n_{(\lceil \gamma \rceil_{jkt})} \in N \quad (19)$$

$$s_{kt} + \sum_{j \in J} z_{jk4t} - \mu_{kt} - w_{n_{(\lceil \delta \rceil_{kt})}} = \lceil \delta \rceil_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T, n_{(\lceil \delta \rceil_{kt})} \in N. \quad (20)$$

É válido destacar que é feito o particionamento da área de cada talhão $i \in I$ antes de inseri-lo no modelo. Desta forma, o valor de α_{ij} já está descontando a área referente ao estoque inicial de campo ε_{jk11} de cada tipo de madeira $k \in K$ das frentes operacionais $j \in J$.

4.2.4 Disponibilidade de *harvester* e *forwader*

Esta seção detalha as restrições que estabelecem a disponibilidade do *harvester* e *forwader*, para cada frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$, que, por sua vez, limita a capacidade de colheita e baldeio, respectivamente. A ideia consiste em estabelecer uma relação similar às diretrizes da empresa para o uso eficiente dos equipamentos, em que é obrigatório o uso de todo quantitativo de horas de *harvester* (Υ_{jt}) e *forwader* (τ_{jt}), em cada uma das frentes operacionais $j \in J$ em cada período $t \in T$.

Para cumprir as diretrizes preestabelecidas, as restrições (21) e (22) se associam com as horas disponíveis de *harvesters* e sua capacidade de derrubada, respectivamente. Note que as restrições (21) asseguram que todas as horas de *harvesters* sejam utilizadas em cada frente operacional $j \in J$ em um período $t \in T$. O volume de madeira derrubada de cada tipo $k \in K$ em cada talhão $i \in I$, pertencente a uma frente operacional $j \in J$ no período $t \in T$, deve estar limitado a capacidade do equipamento para uma dada inclinação $r \in R$, tal como indicado pelas restrições (22).

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} h_{ijkrt} = \Upsilon_{jt} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (21)$$

$$\sum_{m \in M} x_{ijkmrt} - h_{ijkrt} \lambda_{ijkrt} = 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, r \in R, t \in T \quad (22)$$

Visando estabelecer os limites de colheita, as restrições (23) mostram que a soma dos volumes de madeira colhidos de todos os tipos de madeira $k \in K$, colheita $m \in M$ e inclinação $r \in R$ ao longo de todos os períodos $t \in T$ não podem superar o volume total de madeira colhida de cada talhão $i \in I$ de uma frente operacional $j \in J$. Já as restrições (24) asseguram que a soma dos volumes de madeira colhida ao longo do tempo não extrapolem o seu limite.

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{ijkmrt} \leq \alpha_{ij} \kappa_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (23)$$

$$\sum_{t \in T} x_{ijkmrt} \leq \frac{\Psi_{ijr}}{100} \alpha_{ij} \kappa_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, m \in M, r \in R. \quad (24)$$

Em se tratando das horas e capacidade de baldeio dos *forwaders*, as restrições (25) e (26) cumprem um papel análogo às restrições (21) e (22), respectivamente, associadas ao uso dos *harvesters*. Além disso, conforme mostrado pelas restrições (27), a capacidade de baldeio está limitada ao volume de madeira que já foi colhida em cada localidade, o que inclui o estoque de

campo e o que foi colhido no período corrente.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} f_{ijkrt} = \tau_{jt} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (25)$$

$$y_{ijkrt} - f_{ijkrt} \sigma_{ijkrt} = 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, r \in R, t \in T \quad (26)$$

$$y_{ijkrt} \leq e_{ijk1rt} + \sum_{m \in M} x_{ijkmrt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, r \in R, t \in T \quad (27)$$

Em adição, as restrições (28) estão relacionadas à possibilidade de oscilação dos equipamentos entre os períodos $t \in T$, em cada frente operacional $j \in J$. O número de equipamentos pode oscilar $\Delta_{jt}\%$, para maior ou para menor, de um mês para o outro para cada frente operacional $j \in J$.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} [100 |h_{ijkrt} - h_{ijk(r-1)t}| - \Delta_{jt} h_{ijk(r-1)t}] - w_{n(\Delta_{jt})} = 0 \quad \forall j \in J, t \in T \mid t \geq 2, n(\Delta_{jt}) \in N. \quad (28)$$

4.3 Função objetivo

No modelo matemático proposto a função objetivo (29) consiste em minimizar as atividades fora dos parâmetros operacionais desejáveis, obtida por meio do somatório das penalidades resultantes do não alcance das metas parametrizadas.

$$\min \sum_{n \in N} w_n \omega_n \rho_n \quad (29)$$

Cada unidade de produção que não atenda a cada uma das restrições do modelo, isto é, valores $w_n > 0$, tal que $n \in N$, seja multiplicada pelo seu respectivo peso ρ_n , definidos em função das prioridades estabelecidas pela empresa.

Ademais, como as variáveis $w_n \mid n \in N$ da função objetivo possuem unidades de medida distintas, como metros cúbicos (m³) de madeira e horas (h) de uso dos equipamentos foi necessário ajustá-las para uma unidade comum. Assim, para torná-las comparáveis e permitir a minimização da soma na função objetivo, foi aplicado um conversor ω_n com base no custo médio em reais (R\$) do metro cúbico de madeira (R\$/m³) e da hora unidade de hora de máquina (R\$/h) para cada restrição vinculada a uma variável w_n .

4.4 Limitações e simplificações do problema real

Durante o desenvolvimento da modelagem matemática para o planejamento operacional florestal, foram reconhecidas e levadas em conta algumas das limitações e simplificações inerentes ao problema real, devido ao prazo restrito para a conclusão do trabalho. Estas limitações e simplificações incluem:

1. **Sequenciamento mensal dos projetos:** Não foi considerado o sequenciamento dos projetos ao longo dos meses para as frentes operacionais;
2. **Custos:** Dados de custos operacionais não foram considerados, visto que a otimização se limitou a minimizar as atividades fora dos parâmetros operacionais desejáveis.
3. **Transporte:** As questões de transporte dependem de uma série de questões vinculadas ao modal e tipo de veículos, mas que foram simplificadas ao estabelecer um fluxo de madeira que vai para os pátios e para as fábricas em cada período, sem a preocupação de como isso será feito.
4. **Blocagem:** A otimização da formação de blocos contíguos para a colheita não foi considerada na modelagem proposta.

5 Análise e discussão dos resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados do modelo matemático para o problema do planejamento operacional da colheita florestal, considerando a função objetivo de minimização das atividades fora dos parâmetros operacionais desejáveis, com a aplicação de diferentes restrições no modelo. Esses experimentos envolveram a validação dos resultados e a utilização de dados reais da empresa, permitindo uma análise comparativa entre os resultados gerados pelo modelo e os resultados obtidos pela empresa em um período específico.

5.1 Experimentos computacionais

Para realização dos testes computacionais, foi utilizado um computador com processador Intel®Xeon®Gold 6132 CPU @ 2.60GHz, com memória RAM de 16 GB e sistema operacional Windows 10 Enterprise de 64 Bits. A implementação do modelo ocorreu no Woodstock, uma ferramenta de modelagem da plataforma Remsoft.

Os experimentos computacionais foram conduzidos em um cenário composto por 2.800 talhões ($i \in I$) somando 21 mil hectares, distribuídos em cinco frentes operacionais ($j \in J$) distintas. Cada talhão i , classificado por diferentes classes de inclinação ($r \in R$), foi sujeito a variados métodos de colheita ($k \in K$), em diferentes meses do ano ($t \in T$), para cada classificação de acesso ($m \in M$).

O horizonte de planejamento adotado foi de 12 meses (janeiro a dezembro), com uma demanda anual de colheita estabelecida para cada frente operacional. Para cada talhão, são geradas várias alternativas de manejo, utilizando os *harvesters* e *forwaders*, o que resulta em diversas possibilidades de solução para um único talhão.

Na modelagem, os objetivos são expressos como restrições em relação às suas metas correspondentes. Essas restrições, por sua vez, são incorporadas à função objetivo do modelo, buscando minimizar os desvios em relação às metas definidas. Cada meta possui um peso e um valor de conversor específico. A ponderação desses desvios por meio dos pesos, como ilustrado na Tabela 1, reflete a importância relativa de cada meta não atendida, determinado pelo valor do conversor associado a cada restrição.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada vinculados à função objetivo do modelo matemático

Tipo de restrição	Variável (w_n)	Conversor (ω_n)	Peso (ρ_n)
Volume mínimo de colheita, por frente operacional, tipo de madeira e tipo de colheita em cada período.	$w_{n(\lfloor \Phi \rfloor_{jkmr})}$	200	[5,15]
Volume máximo de colheita, por frente operacional, tipo de madeira e tipo de colheita em cada período.	$w_{n(\lceil \Phi \rceil_{jkmr})}$	200	[5,15]
Demanda de colheita, por frente operacional e tipo de madeira, em cada período.	$w_{n(\theta_{jkr})}$	200	5
Demanda total de colheita, por tipo de madeira em cada período.	$w_{n(\Theta_k)}$	200	25
Volume mínimo de transporte, por frente operacional, tipo de madeira e locais de estoque em cada período.	$w_{n(\beta_{jklt})}$	200	15
Estoque mínimo de madeira no campo e na estrada, por frente operacional e tipo de madeira no primeiro período.	$w_{n(\lfloor \phi \rfloor_{jk1r})}$	200	10
Estoque mínimo de madeira no campo e na estrada, por frente operacional a partir do segundo período.	$w_{n(\lfloor \phi \rfloor_{jk2r})}$	200	10
Estoque mínimo de madeira nos pátios intermediários, por tipo de madeira em cada período.	$w_{n(\lfloor \gamma \rfloor_{jkr})}$	200	10
Estoque mínimo de madeira no pátio da fábrica, por tipo de madeira em cada período.	$w_{n(\lfloor \delta \rfloor_{kr})}$	200	10
Estoque máximo de madeira no campo e na estrada, por frente operacional e tipo de madeira no primeiro período.	$w_{n(\lceil \phi \rceil_{jk1r})}$	200	10
Estoque máximo de madeira no campo e na estrada, por frente operacional a partir do segundo período.	$w_{n(\lceil \phi \rceil_{jk2r})}$	200	10
Estoque máximo de madeira nos pátios intermediários, por tipo de madeira em cada período.	$w_{n(\lceil \gamma \rceil_{jkr})}$	200	10
Estoque máximo de madeira no pátio da fábrica, por tipo de madeira em cada período.	$w_{n(\lceil \delta \rceil_{kr})}$	200	10
Percentual de variação permitido para os <i>harvester</i> por frente operacional em cada período.	$w_{n(\Delta_{jt})}$	1.000	10

5.1.1 Análise do volume de colheita de madeira

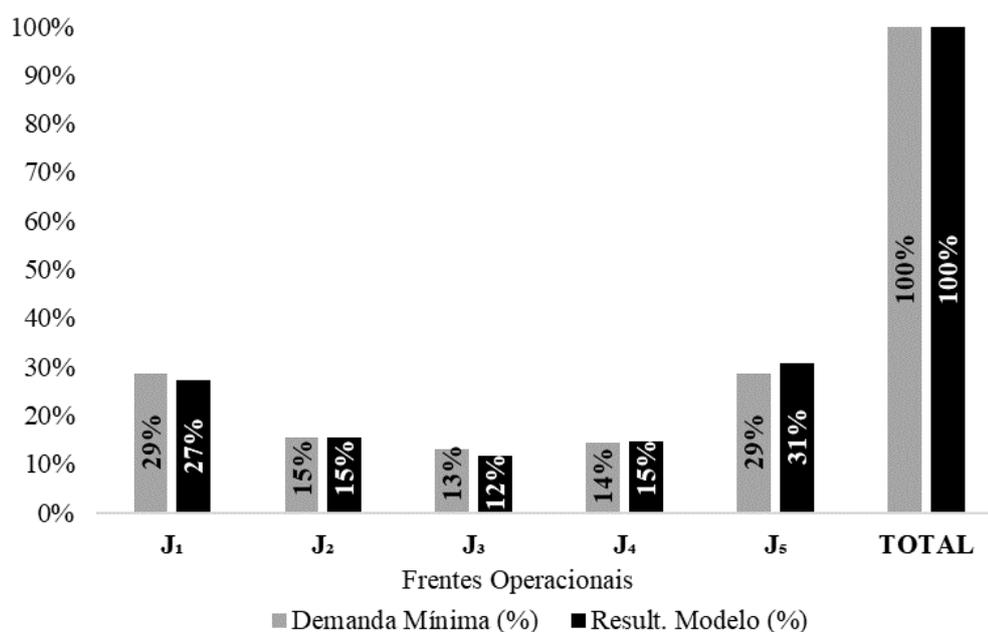
Na Tabela 2, são apresentados os resultados do plano de colheita gerado, que incluem as atividades de corte e baldeio. Esses resultados foram obtidos por meio da otimização mensal integrada dessas atividades, levando em consideração o horizonte de tempo definido e a disponibilidade de equipamentos. Os resultados são expressos em porcentagens para garantir a confidencialidade das informações da empresa. Observa-se que, tanto na produção de derrubada quanto na de baldeio, foi mantida uma produção constante em relação à restrição de demanda ao longo de todos os períodos considerados.

O gráfico apresentado na Figura 3 compara a distribuição do volume de madeira demandado pela empresa, com a solução ótima obtida pelo modelo para o mesmo período, considerando a existência das restrições de demanda de colheita, em metros cúbicos (m^3), por frente operacional (Equações (3)) e àquelas que reúnem todas cinco frentes operacionais (Equações (4)). O gráfico da Figura 3 agrega todos os tipos de madeira representados pelo conjunto K do modelo matemático.

Tabela 2 – Volume percentual de derrubada e baldeio mensal em relação à demanda total

Mês	Derrubada (%)	Baldeio (%)
Jan.	8	8
Fev.	8	7
Mar.	9	10
Abr.	8	8
Mai.	8	8
Jun.	9	8
Jul.	8	9
Ago.	8	9
Set.	9	9
Out.	8	8
Nov.	9	8
Dez.	8	8
Total	100	100

Figura 3 – Demanda de colheita × realizado pelo modelo



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme descrito na Tabela 1, a restrição relacionada à demanda total tem um peso maior do que o atendimento à demanda por frente operacional. Observa-se no gráfico da Figura 3 que a demanda total de colheita foi atendida, com pequenas variações nas demandas por frente operacional, exceto pela frente operacional número 2.

Outra questão relevante a se destacar, diz respeito aos volumes de colheita por cada tipo de acesso (conjunto M do modelo), que varia em função das condições climáticas (Equações (1)-(2)). Estas restrições determinam os períodos ideais para a colheita de cada classificação de acesso, sendo elas: estratégico (PE), transição (PT) e seco (PS).

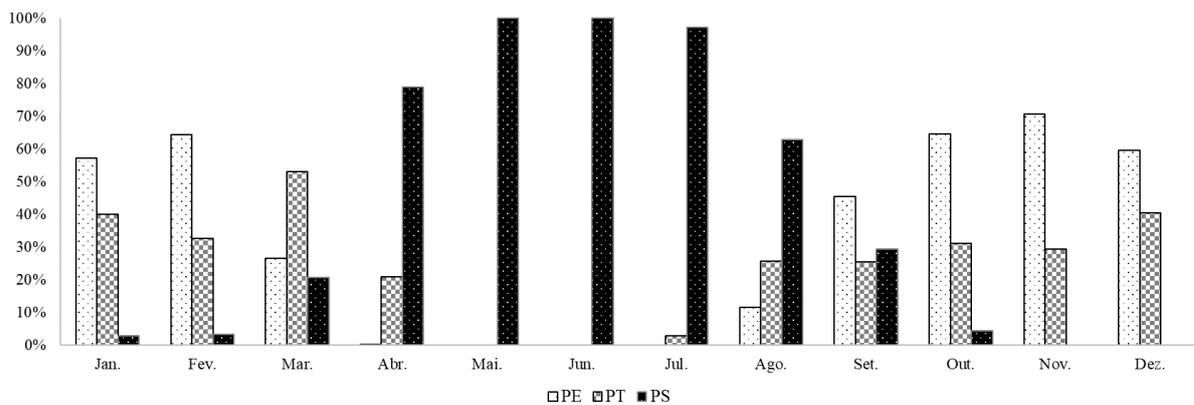
A Tabela 3 mostra como foram definidos os pesos de referência (valores de ρ_n dentro do intervalo de valores indicados nas duas primeiras linhas da última coluna da Tabela 1) vinculados a cada variável w_n pertencente a uma restrição de demanda associada aos diferentes tipos de acesso de colheita, considerando as prioridades estabelecidas pela empresa (ideal, baixa ou alta) que variam em função das condições climáticas vinculadas a cada mês do ano.

Tabela 3 – Prioridade estabelecida (ideal, baixa ou alta) para cada tipo de colheita (conjunto M do modelo) para cada mês do ano, em função das condições climáticas

Condição climática	Meses											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Estratégico (PE)	Ideal	Baixa				Alta			Baixa		Ideal	
Transição (PT)	Baixa	Ideal				Alta			Ideal		Baixa	
Seco (PS)	Alta	Baixa				Ideal			Baixa		Alta	

As restrições (1)-(2) estabeleciam que, caso a colheita de projetos de uma determinada classificação ocorresse em períodos inadequados, o volume colhido seria penalizado de forma mais ou menos expressiva na função objetivo, conforme a criticidade do período. A Figura 4 mostra a distribuição da colheita por tipo de acesso ao longo dos períodos do planejamento, obtida pelo simulador adotado pela empresa. De forma análoga, a Figura 5 mostra o resultado ótimo indicado pelo modelo proposto.

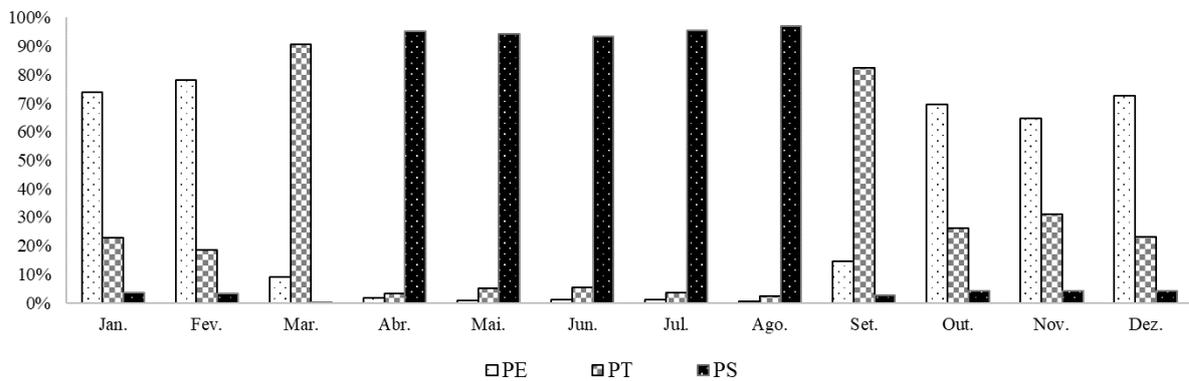
Figura 4 – Distribuição mensal da colheita para cada tipo de acesso por tipo acesso obtida pela pelo simulador da empresa



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao comparar as Figuras 4 e 5, observa-se que o modelo matemático (Figura 5) proporciona uma distribuição da classificação de maneira coerente com os períodos considerados como ideais para a colheita de cada tipo. Esse mesmo padrão se observa também na distribuição feita via simulador (Figura 4).

Figura 5 – Distribuição mensal da colheita para cada tipo de acesso por tipo acesso obtida pela solução ótima do modelo

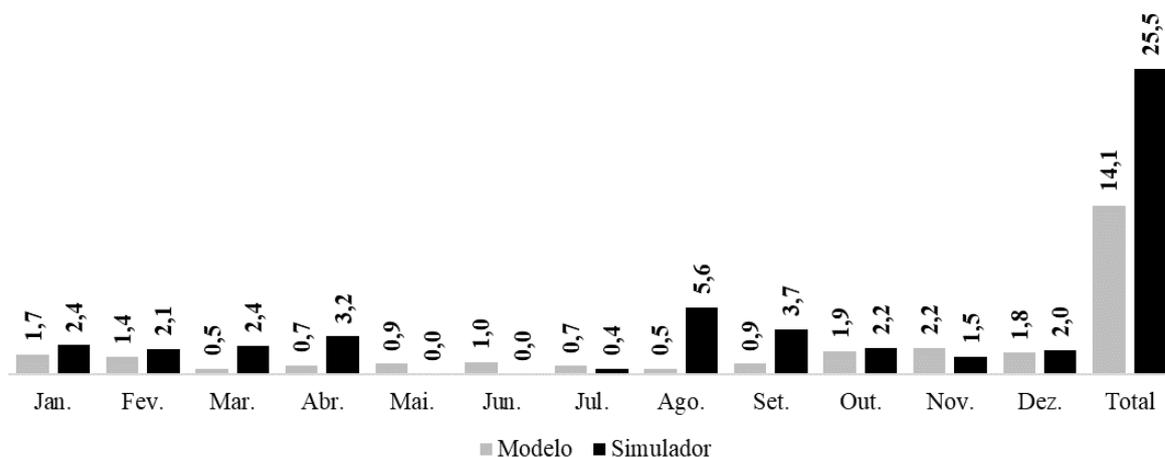


Fonte: Elaborado pela autora.

Por outro lado, a solução apresentada pelo simulador na Figura 4 se mostra um pouco menos sensível as prioridades ideais preestabelecidas. Esse padrão pode ser observado, por exemplo, nos meses de março, abril, agosto e setembro, que apresentam uma diferença percentual menos expressiva entre os diferentes tipos de acesso de colheita, quando comparado com a solução do modelo matemático (Figura 5).

De forma complementar a Figura 6 mostra a soma das penalidades em percentual (%) multiplicadas pelos pesos correspondentes, aplicadas às colheitas realizadas fora dos períodos ideais determinados pelo modelo e pelo simulador. Notavelmente, durante os períodos de transição entre os tipos de acesso, o simulador demonstra uma penalização mais elevada, aproximadamente 55% superior em comparação à solução do modelo matemático.

Figura 6 – Penalidades mensais, em percentual (%), multiplicadas pelos pesos correspondentes e aplicadas às colheitas realizadas fora dos períodos considerados ideais



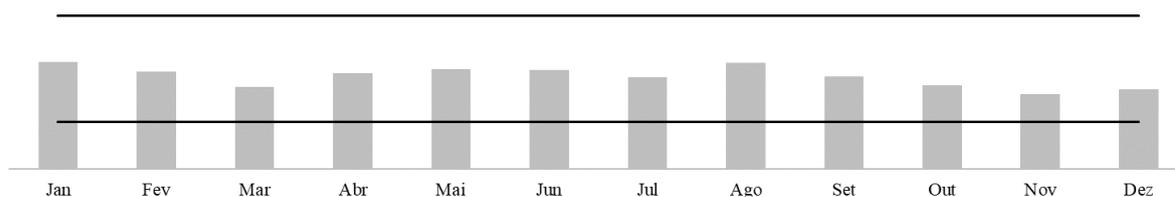
Fonte: Elaborado pela autora.

Essas diferenças nas penalidades indicadas na Figura 6 sugerem que o planejamento pode ser aprimorado através da otimização matemática. O planejamento via simulador não consegue avaliar todas as possíveis alternativas e combinações de restrições, disponibilidades de áreas e variáveis contidas nesse processo complexo. Em contraste, o modelo matemático, ao integrar essas diversas dimensões, consegue propor soluções mais eficientes e eficazes, minimizando os desvios e otimizando a utilização dos recursos disponíveis.

5.1.2 Análise dos estoques

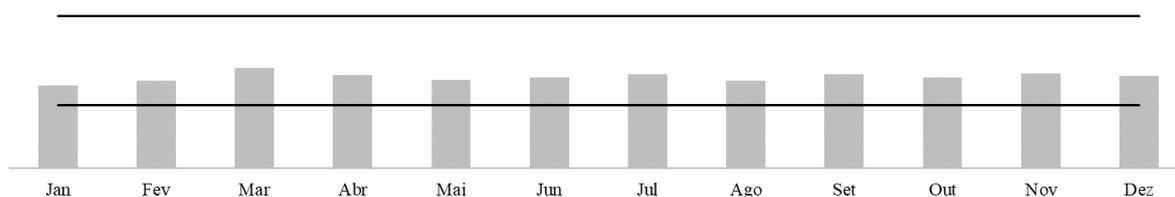
A gestão dos estoques de madeira nos quatro diferentes locais considerados (campo, estrada, pátios intermediários e fábrica), foi outro ponto considerado no modelo, que, em caso de descumprimento das metas estabelecidas, penalizava o valor da função objetivo. As Figuras 7, 8 e 9 apresentam os níveis de mix estoque (com casca e descascado) em campo, estrada e pátios intermediários, respectivamente.

Figura 7 – Estoque de campo do mix que reúne as madeiras com casca e descascadas



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 8 – Estoque de estrada do mix que reúne as madeiras com casca e descascadas

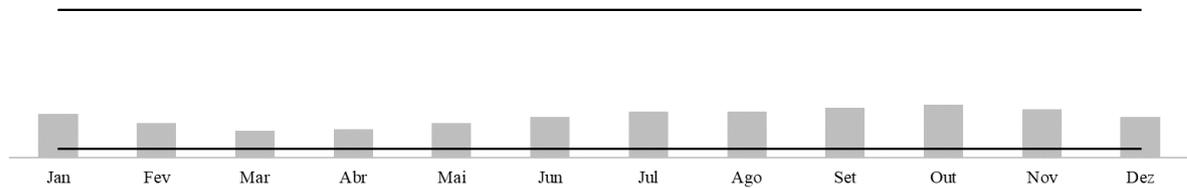


Fonte: Elaborado pela autora.

A solução apresentada pelo modelo se mostrou capaz de manter níveis de estoque estáveis e dentro dos limites máximos e mínimos preestabelecidos, para os três tipos de estoque. Novamente, para preservar os dados da empresa, em nenhum dos gráficos foram apresentados os valores efetivos nos níveis de estoques, por se tratarem de informações estratégicas para a empresa, sendo as Figuras 7, 8 e 9 construídas em uma escala comum.

Em se tratando do estoque de estrada (Figura 8), a capacidade do baldeio foi dimensionada levando em consideração a disponibilidade total dos *forwarders* e os níveis ideais de estoques no campo.

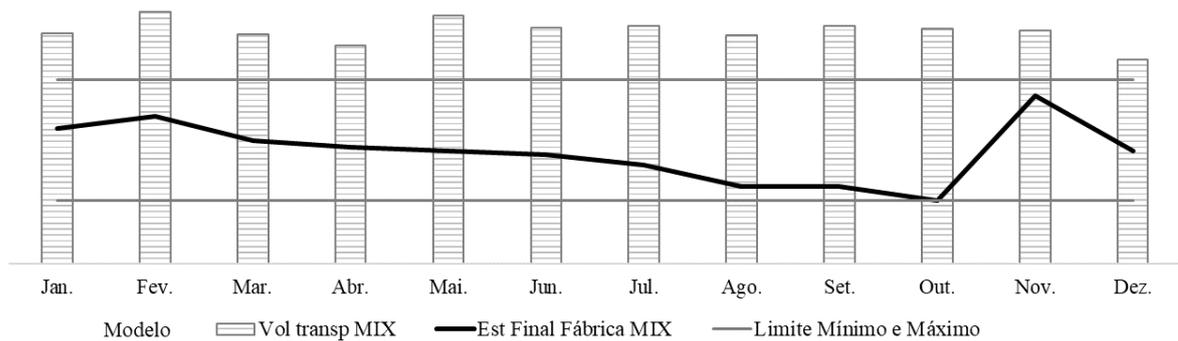
Figura 9 – Estoque dos pátios intermediários do mix que reúne as madeiras com casca e descascadas



Fonte: Elaborado pela autora.

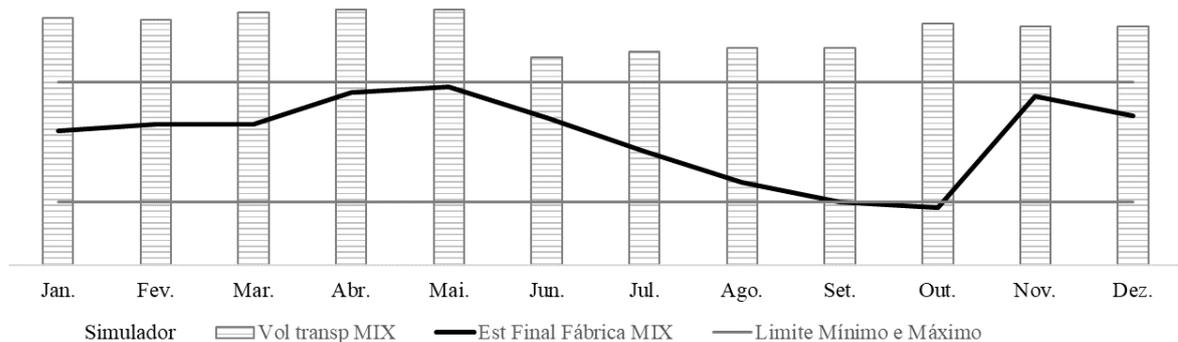
Em relação aos estoques de fábrica, as Figuras 10 e 11 mostram a relação entre o volume transportado, representado pelas barras hachuradas, o estoque final da fábrica, ilustrado pela linha preta, e os limites mínimo e máximo, indicados pelas duas linhas horizontais, ao longo do tempo, para o modelo matemático e o simulador, respectivamente.

Figura 10 – Estoque de fábrica do mix que reúne as madeiras com casca e descascadas obtido pelo modelo matemático



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 11 – Estoque de fábrica do mix que reúne as madeiras com casca e descascadas obtido pelo simulador



Fonte: Elaborado pela autora.

Na solução apresentada pelo modelo matemático (Figura 10) observa-se uma variação mais próxima do valor médio entre os valores máximos e mínimos estabelecidos, ao longo do ano. A solução do simulador (Figura 11), por sua vez, mantém em um patamar um pouco mais alto do que o valor médio entre os valores máximos e mínimos, ao longo do ano. Em ambos os casos, a recuperação do estoque, observada a partir de novembro, é resultado de um menor consumo planejado para outubro devido à uma parada geral de manutenção da fábrica no período.

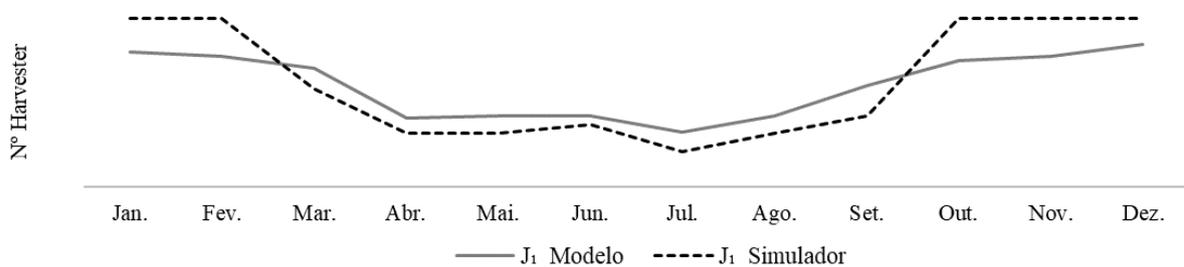
Na opinião da equipe de planejamento da empresa, as particularidades destacadas na Figura 10 não representam uma situação ideal, na prática, o que indica a necessidade aprimorar o modelo para melhor alinhamento com a realidade operacional. Esse padrão pode indicar a necessidade da realização de ajustes no volume de transporte ao longo do tempo, para evitar riscos de escassez e garantir a manutenção das operações de forma eficiente.

Por outro lado, ao analisar a solução mostrada pelo simulador (Figura 11), o estoque de fábrica sugere que o simulador possa estar captando, de forma mais segura, as variações e incertezas operacionais, resultando em estoques um pouco mais elevados. Esse tipo de solução tende a mitigar potenciais riscos de escassez e assegurar a continuidade das operações da fábrica.

5.1.3 Análise do uso dos equipamentos

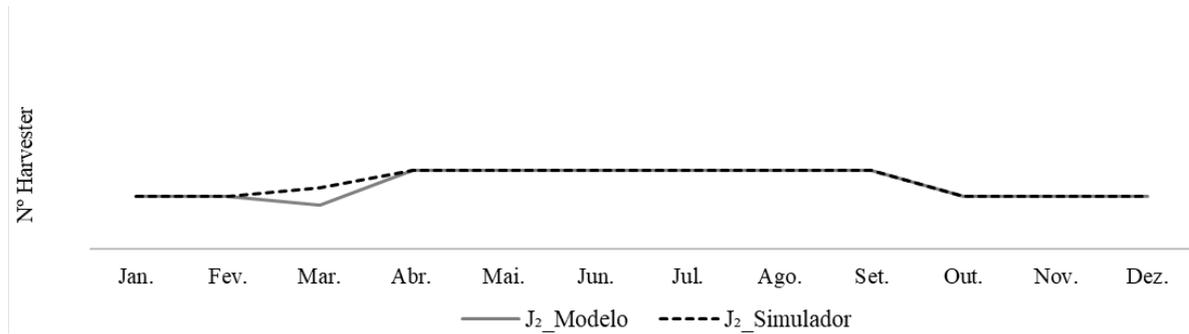
As restrições (21) a (27) que tratam do uso dos equipamentos *harvester* e *forwarder* não penalizam a função objetivo, por se tratarem de uma estratégia da empresa para utilização eficiente de seus recursos. Assim, o modelo de otimização visa garantir a utilização plena das horas dos equipamentos ao longo de todo o período de planejamento. As Figuras 12 a 16 mostram a alocação dos *harvesters* indicada pelo modelo e pelo simulador, para cada uma das cinco frentes operacionais, respectivamente.

Figura 12 – Alocação dos *harvesters* na frente operacional J_1 ao longo dos meses do ano



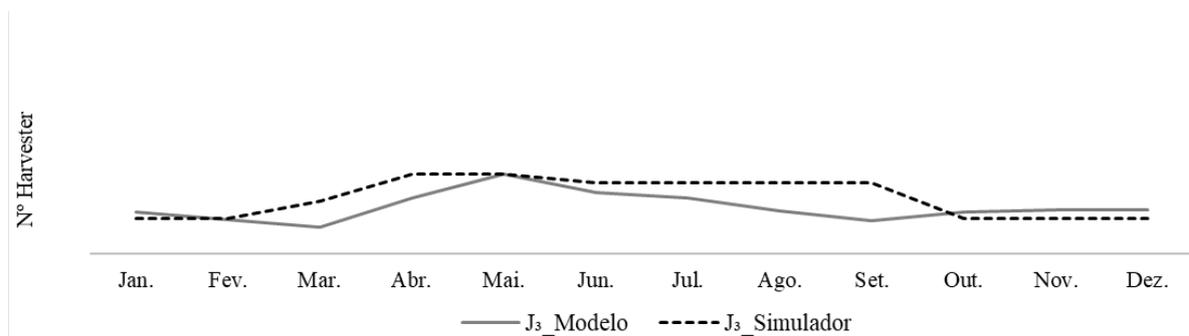
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 13 – Alocação dos *harvesters* na frente operacional J_2 ao longo dos meses do ano



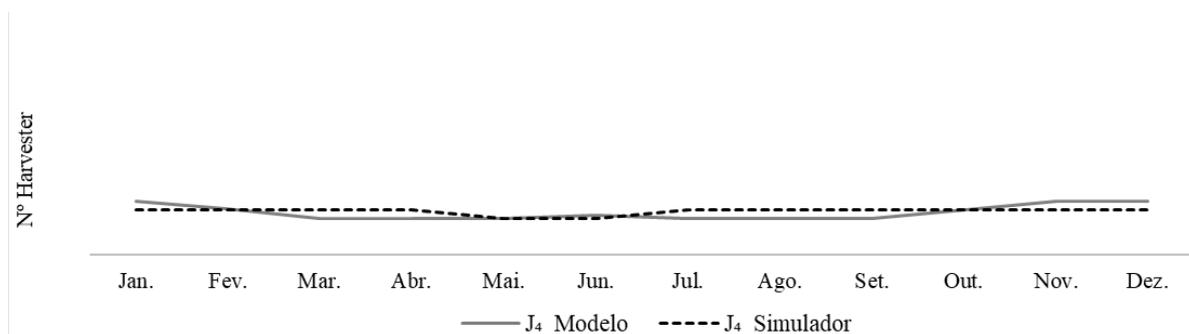
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 14 – Alocação dos *harvesters* na frente operacional J_3 ao longo dos meses do ano



Fonte: Elaborado pela autora.

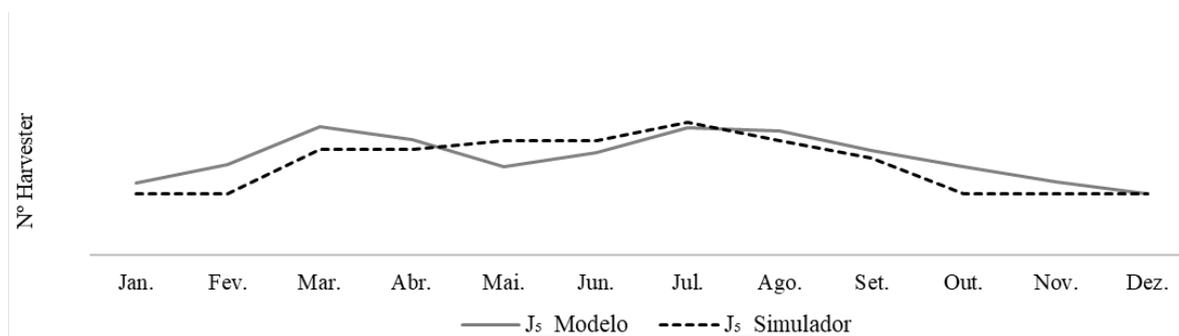
Figura 15 – Alocação dos *harvesters* na frente operacional J_4 ao longo dos meses do ano



Fonte: Elaborado pela autora.

A variação na alocação dos *harvesters* nas frentes ao longo dos meses é influenciada pela disponibilidade de projetos por classificação do tipo de acesso (conjunto M do modelo) em cada frente operacional (conjunto J do modelo). Ao analisar as alocações dos equipamentos nas Figuras 12 a 16, é possível perceber que há diferenças sutis entre o resultado indicado pelo modelo e o planejamento realizado por meio da simulação, em todas as frentes operacionais. Essa diferença representa uma variação média mensal de 2% nas alocações dos equipamentos entre as soluções.

Figura 16 – Alocação dos *harvesters* na frente operacional J₅ ao longo dos meses do ano



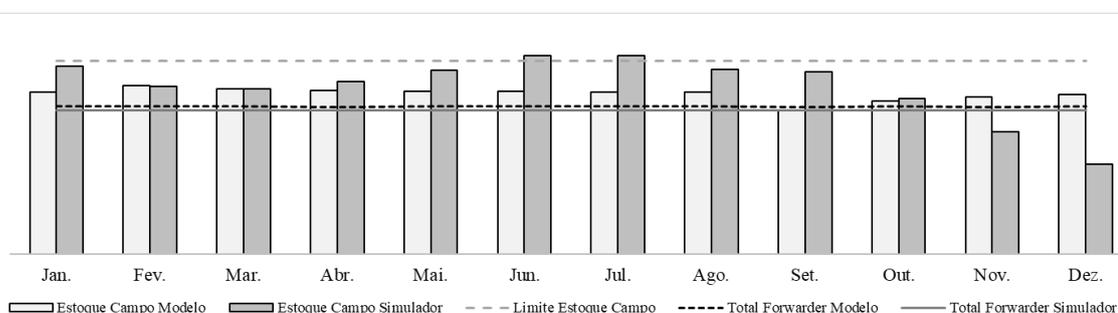
Fonte: Elaborado pela autora.

A frente J₄ (Figura 16) manteve uma utilização constante de equipamentos ao longo dos meses. Por outro lado, as frentes operacionais J₂, J₃ e J₅ tiveram um número maior de equipamentos no período de abril a setembro e menor no primeiro e último trimestres do ano. Esse padrão se deve à menor disponibilidade de projetos estratégicos nessas frentes operacionais durante esses períodos, o que resulta em um maior número de equipamentos alocados para colheita de projetos classificados como seco, quando permitido, a fim de atender à demanda anual de colheita.

A frente operacional J₁ resultou no efeito oposto ao padrão observado nas frentes J₂, J₃ e J₅. Em J₁ há uma maior disponibilidade de projetos para colheita no período estratégico, recebendo, portanto, uma maior alocação de máquinas no início e final do ano.

Em se tratando da alocação dos *forwarders*, a Figura 17 faz um comparativo entre alocação dos *forwarders* e o estoque de campo ao longo dos 12 meses do ano. Na Figura 17 as barras indicam os estoques de campo (modelo e simulador) para cada mês. Há também uma linha tracejada (mais espaçada) que destaca o limite do estoque de campo. Outras duas linhas, uma cheia e outra com tracejados menos espaçados, são utilizadas para mostrar o total de *forwarders* utilizados no simulador e no modelo, respectivamente.

Figura 17 – Alocação dos *forwarders* e estoque de campo ao longo dos meses do ano



Fonte: Elaborado pela autora.

Pela Figura 17 é possível observar que a solução do modelo matemático utiliza mais *forwarders* do que o simulador. Trata-se de uma diferença de um único equipamento a mais indicada pela solução do modelo. Por outro lado, ao analisar o comportamento dos estoques de campo das duas soluções, percebe-se que a solução do simulador, manteve os estoques mais elevados em oito dos doze meses, bem como ultrapassou ligeiramente os limites nos meses de junho e julho. Como se trata de uma diferença pequena nos níveis de estoque da solução do simulador, acredita-se que ela poderia ser compensada com o aumento de um *forwarder*, o que tornaria as duas soluções equivalentes.

5.1.4 Considerações adicionais em relação aos resultados obtidos

É importante destacar que, o objetivo deste estudo não é comparar as duas metodologias de planejamento (simulador e modelo matemático). É de se esperar que a modelagem ofereça resultados mais eficientes em termos de alocação de recursos, por se tratar de uma solução otimizada. Assim, pode-se dizer que esta comparação foi feita com o objetivo de evidenciar a validar a saída do modelo matemático, considerando as restrições operacionais impostas.

Conforme destacado no capítulo anterior, o modelo matemático possui limitações quanto ao contexto real. Por outro lado, os resultados indicados pelo modelo demonstram a sua capacidade de otimizar o processo de colheita, armazenagem e transporte, o que pode propiciar, no futuro, benefícios para a realização do planejamento operacional das atividades florestais de curto prazo da empresa.

6 Considerações finais

Este estudo abordou o problema do planejamento operacional de curto prazo de uma empresa produtora de celulose, que inclui as atividades de colheita (derrubada e baldeio), armazenagem em pátios intermediários e fábrica e transporte de madeira em diferentes frentes operacionais para o horizonte de tempo de 12 meses.

A metodologia de pesquisa proposta envolveu a formulação de um modelo de programação linear capaz de representar e resolver o problema. Para isso, foi necessário a exportação de dados reais, provenientes de diversos módulos do sistema ERP da empresa, bem como o auxílio da equipe responsável pelo planejamento florestal de curto prazo que atua na empresa e a implementação do modelo em ambiente computacional, compatível com a plataforma da empresa Remsoft.

Os resultados demonstraram a eficácia do modelo proposto na otimização do planejamento operacional de curto prazo da empresa, permitindo a integração de aspectos operacionais e levando em consideração um conjunto de restrições reais. O modelo foi validado a partir de comparações entre a solução obtida ao resolver o modelo de forma ótima e uma solução baseada no uso de um simulador, que representa as práticas atuais de planejamento da empresa.

A solução apresentada pelo modelo matemático indicou a utilização adequada de todos os recursos disponíveis da empresa (*harvesters* e *forwarders*), ao manter um volume de colheita (m^3) constante ao longo do tempo, e respeitando os limites de estoques para cada ponto de controle. Este equilíbrio entre a demanda e capacidade operacional permitiu menores oscilações de estoques.

Os resultados indicaram que houve uma variação média de 2% na alocação dos *harvesters*, quando avaliadas todas as frentes operacionais em conjunto, para o atendimento das restrições de classificação por tipo de acesso à colheita (estratégico, transição ou seco). Ademais, a solução do modelo apresentou uma menor penalização em função do tipo de classificação de acesso à colheita, cerca de 55% menor em períodos de transição.

É importante destacar que, embora o modelo proposto tenha sido capaz de cumprir com os objetivos estabelecidos nesta pesquisa, há também limitações em relação ao contexto real. Para a efetiva operacionalização do modelo, na prática, serão necessários ajustes adicionais como o refinamento do transporte em determinados meses do horizonte de planejamento, visando um melhor equilíbrio nos níveis dos estoques da fábrica.

Em suma, é possível concluir que o modelo de programação linear proposto é capaz de oferecer benefícios tangíveis para o planejamento operacional de curto prazo da área florestal da empresa, uma vez que, ele representa bem as características do problema real que foram consideradas neste estudo.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se inclusão de variáveis e restrições que envolvam as questões de tempo pós-corte (TPC) e densidade da madeira, conhecidas por influenciarem na qualidade da madeira entregue à fábrica. Ao selecionar áreas de colheita com base na otimização da densidade da madeira e no transporte para atender ao TPC ideal, espera-se que se possa reduzir os custos logísticos, que representam cerca de 30% do custo da madeira.

Outro elemento a ser considerados para trabalhos futuros é o sequenciamento mensal dos projetos ao longo dos meses, para cada frente operacional, associado a modelagem da restrição espacial dos talhões para colheita, com o objetivo de gerar a blocagem. Assim, ao concentrar a colheita em blocos, espera-se que haja uma redução nos deslocamentos, favorecendo o controle da regulação das florestas.

Em relação aos estoques da fábrica, sugere-se a inclusão de restrições que estabeleçam uma relação mais próxima às metas da empresa. Além dos limites e penalidades para os valores máximos e mínimos já parametrizados, essas novas restrições poderiam, por exemplo, estabelecer uma meta mensal dentro desse intervalo, com uma penalização menor, para absorver possíveis contingências de abastecimento.

Referências

- AKBULUT, R.; BETTINGER, P.; UCAR, Z.; OBATA, S.; BOSTON, K.; SIRY, J. Spatial forest plan development using heuristic processes seeded with a relaxed linear programming solution. **Forest Science**, v. 63, n. 5, p. 518–528, 08 2017. ISSN 0015-749X. Disponível em: <<https://doi.org/10.5849/FS-2017-040>>. Acesso em: 26 fev. 2024.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; MENDES, J. B.; CABACINHA, C. D.; DE ASSIS, A. L.; MATOS, L. M. A.; LEITE, H. G. Meta-heuristic clonal selection algorithm for optimization of forest planning. **Revista Árvore**, v. 41, n. 6, p. e410607, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-90882017000600007>>. Acesso em: 26 fev. 2024.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 544 p. ISBN 8535214542.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D. **Planejamento florestal otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita**. 185 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_ms/2014/d684_0872-M.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2024.
- BANHARA, J. R. **Agendamento otimizado das atividades de colheita de madeira em plantios de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e de risco climático**. 166 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/D.11.2009.tde-05082009-074058>>. Acesso em: 01 mar. 2024.
- BELAVENUTTI, P.; ROMERO, C.; DIAZ-BALTEIRO, L. A critical survey of optimization methods in industrial forest plantations management. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 3, p. 239–245, maio/jun. 2018. ISSN 1678-992X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0479>>. Acesso em: 26 fev. 2024.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia**. 1. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2013. 568 p. ISBN 8535248935.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest management and planning**. 2. ed. London: Academic Press, 2017. 342 p. ISBN 9780128094761.
- CAUCHICK-MIGUEL, P. A.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 244 p. ISBN 9788535291346.
- COGSWELL, A.; FEUNEKES, U. A hierarchical approach to spatial forest planning. In: SEVENTH SYMPOSIUM ON SYSTEMS ANALYSIS IN FOREST RESOURCES, MAI. 1997, TRAVERSE CITY, MICHIGAN, USA. **Seventh Symposium on Systems Analysis in Forest Resources**. Benzonia, Michigan, USA: United States Department of Agriculture, 2000. p. 7–13. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=6_khLP7OUo0C&oi=fnd&pg=PA7&dq=A+Hierarchical+Approach+To+Spatial+Forest+Planning&ots=R9cs6S-vSC&sig=dke1rD98JjAp2uC7_j9io3-Hq3M>. Acesso em: 9 fev. 2024.

- DE CERQUEIRA FILHO, L. S. C. Planejamento e conhecimento. **Opiniões**, v. 47, p. 24–25, 2017. Disponível em: <<https://florestal.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/detalhes/7-planejamento-e-conhecimento/#>>. Acesso em: 26 fev. 2024.
- DE PAULA JÚNIOR, G. G.; PEREIRA, A. R. Dimensionamento de uma frota de caminhões para transporte de carvão vegetal por meio da programação linear. **Scientia Forestalis**, n. 21, p. 85–95, 1980. Disponível em: <<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr21/cap06.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2024.
- DIAZ-BALTEIRO, L.; BERTOMEU, M.; BERTOMEU, M. Optimal harvest scheduling in Eucalyptus plantations: A case study in Galicia (Spain). **Forest Policy and Economics**, v. 11, n. 8, p. 548–554, 2009. ISSN 1389-9341. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.07.005>>. Acesso em: 9 fev. 2024.
- DOS SANTOS, P. A. V. H. **Uma metodologia de otimização integrada para a colheita e o transporte de produtos florestais**. 106 p. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1884/65423>>. Acesso em: 01 mar. 2024.
- DOS SANTOS, P. A. V. H.; DA SILVA, A. C. L.; ARCE, J. E.; AUGUSTYNCZIK, A. L. D. A mathematical model for the integrated optimization of harvest and transport scheduling of forest products. **Forests**, v. 10, n. 12, p. 1–13, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/f10121110>>. Acesso em: 01 mar. 2024.
- DOS SANTOS, S. L. M. O planejamento da logística do suprimento de madeira. **Opiniões**, v. 13, p. 30–31, 2008. Disponível em: <<https://florestal.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/detalhes/9-o-planejamento-da-logistica-do-suprimento-de-mad/>>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- FRANÇA, L. C. de J.; JÚNIOR, F. W. A.; JAROCHINSKI E SILVA, C. S.; MONTI, C. A. U.; FERREIRA, T. C.; SANTANA, C. J. de O.; GOMIDE, L. R. Forest landscape planning and management: A state-of-the-art review. **Trees, Forests and People**, v. 8, p. 100275, 2022. ISSN 2666-7193. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100275>>. Acesso em: 9 fev. 2024.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022. 208 p. ISBN 6559771636.
- GONÇALVES, J. C. **Otimização do agendamento da colheita florestal com aplicação de restrições de adjacência**. 99 p. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2023. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1884/82070>>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- HAYATI, D.; KARAMI, E.; SLEE, B. Combining qualitative and quantitative methods in the measurement of rural poverty: the case of Iran. **Social Indicators Research**, Springer, v. 75, p. 361–394, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11205-004-6299-9>>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- JAROCHINSKI E SILVA, C. S. **Alocação de fomentos florestais sob condições de incerteza**. 89 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2019. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/37403>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber Harvest and investment under different objectives: discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 23, n. suppl_1, p. a0001—z0001, 1977. Disponível em: <https://academic.oup.com/forestscience/issue/23/suppl_1>. Acesso em: 10 fev. 2024.

KANGAS, A.; KURTTILA, M.; HUJALA, T.; EYVINDSON, K.; KANGAS, J. **Decision support for forest management**. 2. ed. Switzerland: Springer, 2015. 307 p. (Managing Forest Ecosystems). ISBN 9783319235226. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-23522-6>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

KAYA, A.; BETTINGER, P.; BOSTON, K.; AKBULUT, R.; UCAR, Z.; SIRY, J.; MERRY, K.; CIESZEWSKI, C. Optimisation in forest management. **Current Forestry Reports**, v. 2, n. 1, p. 1–17, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s40725-016-0027-y>>. Acesso em: 26 fev. 2024.

LOPES, E. d. S. Planejamento estratégico na colheita de madeira. **Opiniões**, v. 43, p. 34–35, 2016. Disponível em: <<https://florestal.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/detalhes/12-planejamento-estrategico-na-colheita-de-madeira/>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

LOPES, P. F. **Autômato celular no planejamento da colheita florestal**. 83 p. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017. Disponível em: <<https://locus.ufv.br/handle/123456789/30095>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita Florestal**. 3. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2014. cap. 7, p. 206–252. ISBN 9788572694919.

MARQUES, A.; AUDY, J.; D’AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M. Tactical and operational harvest planning. In: BORGES, J.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M.; RODRIGUEZ, L. C. E. (Ed.). **The management of industrial forest plantations**. Dordrecht: Springer, 2014, (Managing Forest Ecosystems, v. 33). p. 239—267. ISBN 9789401788984. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_7>. Acesso em: 10 fev. 2024.

MATOS, L. M. A. **Aplicações da pesquisa operacional no manejo e planejamento florestal**. 73 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020. Mestrado em Engenharia Florestal. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1884/74595>>. Acesso em: 01 mar. 2024.

MATOS, L. M. A.; MAGALHÃES, E. C.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; ARCE, J. E. Uma revisão crítica das ferramentas de pesquisa operacional aplicada ao planejamento florestal nos periódicos brasileiros. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 4, p. 2035–2055, 2021. ISSN 1980-5098. Disponível em: <<https://doi.org/10.5902/1980509853248>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

MCDILL, M. E. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. (Ed.). **The management of industrial forest plantations: theoretical foundations and applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. p. 27–59. ISBN 9789401788991. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_2>. Acesso em: 10 fev. 2024.

MEGGINSON, L. C.; MOSLEY, D. C.; PIETRI JÚNIOR, H. P. **Administração: conceitos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Harbra, 1988. 63 p. ISBN 9788529400648.

PIMENTEL, A.; CEZANA, D. P. O planejamento aplicado. **Opiniões**, v. 47, p. 26–27, 2017. Disponível em: <<https://florestal.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/detalhes/8-o-planejamento-aplicado/>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 225 p. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001. Disponível em: <<https://locus.ufv.br/handle/123456789/11178>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. d. R. (Ed.). **Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. 1. ed. Brasília, DF, 2014. 138 p. ISBN 9788570354006. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1010933>>. Acesso em: 09 fev. 2024.

SANTOS, A. C. d. A. **Modelagem matemática para planejamento operacional integrado das atividades de colheita, baldeio e transporte**. 77 p. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019. Disponível em: <<https://poscienciaflorestal.ufv.br/wp-content/uploads/2023/05/Ana-Carolina-A-Santos.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

SILVA, A. F. d.; MARINS, F. A. S. Revisão da literatura sobre modelos de programação por metas determinística e sob incerteza. **Production**, SciELO Brasil, v. 25, n. 1, p. 92–112, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-65132014005000003>>. Acesso em: 02 abr. 2024.

WERNEBURG, M. A. P. **Planejamento em grandes empresas florestais no Brasil**. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) — Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, 2015. Disponível em: <<http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/handle/1/1045>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P.; KONOSHIMA, M. Stand-level forest management planning approaches. **Current Forestry Reports**, v. 2, n. 3, p. 163–176, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/0.1007/s40725-016-0041-0>>. Acesso em: 26 fev. 2024.