



THULIANY FERNANDES ARAUJO PAES

**UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA CONSTRUTIVA PARA
AGENDAR E SEQUENCIAR ATIVIDADES SILVICULTURAIS
EM JANELAS DE TEMPO RESTRITAS**

**LAVRAS – MG
2025**

THULIANY FERNANDES ARAUJO PAES

**UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA CONSTRUTIVA PARA AGENDAR E
SEQUENCIAR ATIVIDADES SILVICULTURAIS EM JANELAS DE TEMPO
RESTRITAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Lucas Rezende Gomide
Orientador

**LAVRAS – MG
2025**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo(a) autor(a) através do Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA.

Fernandes Araujo Paes, Thuliany.

Uma abordagem heurística construtiva para agendar e sequenciar atividades silviculturais em janelas de tempo restritas / Thuliany Fernandes Araujo Paes. 2025.
73 p. : il.

Orientador: Lucas Rezende Gomide

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Planejamento silvicultural. 2. Heurística construtiva. 3. Janela de tempo. 4. Agendamento. 5. Sequenciamento. I. Rezende Gomide, Lucas. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

THULIANY FERNANDES ARAUJO PAES

**UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA CONSTRUTIVA PARA AGENDAR E
SEQUENCIAR ATIVIDADES SILVICULTURAIS EM JANELAS DE TEMPO
RESTRITAS**

**A CONSTRUCTIVE HEURISTIC APPROACH FOR SCHEDULING AND
SEQUENCING FORESTRY ACTIVITIES IN CONSTRAINT TIME WINDOWS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 24 de Janeiro de 2025.

Dr. Lucas Rezende Gomide UFLA

Dra. Carolina Souza Jarochinski e Silva UFLA

Dr. Daniel Henrique Breda Binoti Eldorado Brasil

Prof. Lucas Rezende Gomide
Orientador

**LAVRAS – MG
2025**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à força suprema, a qual chamamos de Deus, por ter me fornecido coragem, resiliência e dedicação para trilhar mais essa jornada.

Ao meu marido e à minha família pelo amor e apoio incondicional, encorajamento, suporte nos momentos mais turbulentos de trabalho e estudos, e pela paciência com minha ausência e estresse pelas noites de sono mal dormidas.

À Universidade Federal de Lavras por ter me acolhido e ao o meu orientador Lucas Gomide que não mediu esforços para estar sempre ao meu lado direcionando, orientando, compartilhando experiência e muitas vezes pegando na mão para a construção desse trabalho. A distância física não foi um problema para que esse trabalho fosse concluído com maestria.

Agradeço também ao Daniel Binoti pelos ensinamentos, por me incentivar e encorajar desde os primeiros passos dessa jornada e aos meus gestores da Eldorado Brasil por disponibilizar o *case*, por apoiarem o trabalho e compreenderem os momentos de maior dedicação à academia. Aos meus amigos pessoais e colegas de trabalho pelas longas conversas e encorajamento constante nos momentos mais turbulentos.

No final de toda jornada é possível olhar para trás e perceber a importância de cada passo e de cada pessoa envolvida na construção constante de um ser humano melhor.

Obrigada a todos, de coração.

RESUMO GERAL

O Brasil desempenha um papel fundamental na expansão do setor florestal na América do Sul, registrando um crescimento expressivo de 52,9% em expansão da área plantada em 14 anos. No entanto, manter esse desempenho é um desafio para o setor. A silvicultura enfrenta fatores externos, como variações climáticas e aumento nos custos de insumos, assim como fatores internos, como a complexidade do sequenciamento de um elevado número de operações, em intervalos de tempo pré-estabelecidos, que exigem alto nível de organização. Essas operações, realizadas por equipes que podem ou não ser exclusivas à cada atividade, tornam-se ainda mais críticas quando a não execução ou a realização fora das janelas de tempo resultam em grandes perdas volumétricas no plantio. O sequenciamento ideal das operações silviculturais, portanto, é um problema altamente complexo. Ele exige o planejamento de um grande número de atividades para diversas unidades de produção (talhões). Devido à complexidade dos problemas florestais, caracterizados por múltiplas variáveis e combinações, métodos heurísticos ou aproximativos surgem como soluções viáveis, pois reduzem o esforço computacional necessário para a geração de soluções ótimas. Este estudo propõe um modelo determinístico de otimização para o microplanejamento operacional em talhões, baseado em uma heurística construtiva. O modelo abrange um horizonte de planejamento anual com periodicidade diária, buscando agendar e sequenciar as atividades do primeiro ano de operação. O objetivo é respeitar as janelas de tempo de cada operação, minimizar os deslocamentos entre talhões e reduzir a ociosidade das equipes. O primeiro capítulo apresenta as definições e a fundamentação teórica do problema. O segundo capítulo detalha o simulador SIOP, proposto para generalizar o problema, reproduzir o status inicial dos talhões e otimizar rotas. Adicionalmente, o algoritmo CHESS-W, foi desenvolvido e testado para realizar o agendamento e sequenciamento de 16 atividades silviculturais no primeiro ano pós-colheita, demonstrando eficiência ao operar com equipes especializadas, respeitando sequências obrigatórias e as janelas de tempo. Por fim, o estudo compara a eficiência do modelo proposto com cenários reais, destacando suas contribuições para o planejamento silvicultural.

Palavras-chave: planejamento silvicultural; heurística construtiva; janela de tempo; agendamento; sequenciamento.

GENERAL ABSTRACT

Brazil plays a key role in the expansion of the forestry sector in South America, recording an impressive growth of 52.9% over 14 years. However, maintaining this performance faces significant challenges. External factors, such as climate variations and rising input costs, combined with internal factors, such as the complexity of sequential operations conducted within pre-established timeframes, demand a high level of organization. These operations, carried out by teams that may or may not be exclusive to each activity, become even more critical when non-execution or delayed implementation results in significant volumetric losses during planting. The optimal sequencing of silvicultural operations, therefore, is a highly complex problem. It requires planning a large number of activities across various production units (plots). As the complexity of forestry problems increases, characterized by multiple variables and combinations, heuristic or approximative methods emerge as viable solutions for highly complex problems, reducing the computational effort needed to find optimal solutions. This study proposes a deterministic optimization model for operational micro-planning in plots, based on a constructive heuristic. The model spans an annual planning horizon with daily periodicity, aiming to schedule and sequence activities for the first year of operation. The goal is to respect the time windows of each operation, minimize travel between plots, and reduce team idleness. The first chapter presents the definitions and theoretical foundation of the problem. The second chapter details the SIOP simulator, capable of generalizing the problem, reproducing the initial status of the plots, and optimizing routes. Additionally, the CHESS-W model, developed for scheduling and sequencing 16 silvicultural activities in the first year post-harvest, demonstrates efficiency by operating with specialized teams, respecting mandatory sequences and time windows. Finally, the study compares the efficiency of the proposed model with real scenarios, highlighting its contributions to silvicultural planning.

Keywords: silvicultural planning; constructive heuristic; time window; scheduling, sequencing.

INDICADORES DE IMPACTOS

A pesquisa propôs uma abordagem heurística construtiva para o agendamento e sequenciamento de atividades silviculturais em janelas de tempo restritas, contribuindo significativamente para o avanço tecnológico na área de planejamento silvicultural, especialmente no contexto do microplanejamento de talhões de reforma. O modelo determinístico de otimização, composto pelos sistemas SIOP e CHESS-W, permitiu a geração de cenários realistas e aplicáveis em larga escala, com destaque para a cobertura de 966 talhões em 28.635,35 hectares e a aplicação em 80 fazendas comerciais, impactando diretamente o planejamento operacional de empresas do setor de base florestal. A ferramenta possibilitou o sequenciamento eficiente de 16 atividades silviculturais prioritárias, garantindo aderência técnica às janelas temporais e minimizando ociosidades e deslocamentos, com 74,8% do tempo útil sequenciado de forma contínua. Embora a eficiência tenha sido 23,5% inferior ao cenário real, os resultados asseguram potencial de aplicação prática com benefícios concretos na organização do trabalho, na redução de perdas operacionais e no uso racional da força de trabalho, representando impactos econômicos relevantes para empresas florestais de médio e grande porte. Do ponto de vista social e extensionista, o trabalho dialoga com o setor produtivo ao propor soluções aplicáveis diretamente em campo, com potencial de beneficiar centenas de profissionais envolvidos nas etapas de planejamento e execução silvicultural, incluindo engenheiros florestais, técnicos operacionais e gestores. O território impactado abrange propriedades rurais em regiões produtoras de florestas plantadas no Brasil, particularmente voltadas à produção de celulose e papel, com efeitos positivos na geração de emprego, qualificação técnica e produtividade no campo. A pesquisa está alinhada às áreas temáticas de "Tecnologia e Produção" e "Trabalho" da Política Nacional de Extensão Universitária e atende diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente os ODS 8 (trabalho decente e crescimento econômico), 9 (indústria, inovação e infraestrutura) e 12 (consumo e produção responsáveis), na medida em que contribui para o uso eficiente de recursos, a inovação tecnológica no manejo florestal e a mitigação de impactos operacionais frente às variabilidades climáticas.

IMPACT INDICATORS

The research proposed a constructive heuristic approach for scheduling and sequencing silvicultural activities in restricted time windows, contributing significantly to technological advancement in the area of silvicultural planning, especially in the context of microplanning of reform plots. The deterministic optimization model, composed of the SIOP and CHESS-W systems, allowed the generation of realistic and applicable scenarios on a large scale, highlighting the coverage of 966 plots in 28,635.35 hectares and the application in 80 commercial farms, directly impacting the operational planning of companies in the forest-based sector. The tool enabled the efficient sequencing of 16 priority silvicultural activities, ensuring technical adherence to the time windows and minimizing idleness and displacements, with 74.8% of the useful time sequenced continuously. Although efficiency was 23.5% lower than the real scenario, the results ensure potential for practical application with concrete benefits in the organization of work, in the reduction of operational losses and in the rational use of the workforce, representing relevant economic impacts for medium and large-sized forestry companies. From a social and extensionist perspective, the work engages with the productive sector by proposing solutions that can be applied directly in the field, with the potential to benefit hundreds of professionals involved in the silvicultural planning and execution stages, including forestry engineers, operational technicians and managers. The impacted territory

includes rural properties in regions producing planted forests in Brazil, particularly focused on the production of pulp and paper, with positive effects on job creation, technical qualification and productivity in the field. The research is aligned with the thematic areas of "Technology and Production" and "Work" of the National Policy for University Extension and directly meets the UN Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDGs 8 (decent work and economic growth), 9 (industry, innovation and infrastructure) and 12 (responsible consumption and production), as it contributes to the efficient use of resources, technological innovation in forest management and the mitigation of operational impacts in the face of climate variability.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	10
1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	O setor brasileiro de floresta plantada	12
2.2	Planejamento e tomada de decisão em ativos florestais	18
2.3	Pesquisa Operacional	25
2.4	Problemas de agendamento de atividades e as aplicações florestais	29
2.5	Considerações finais	33
	REFERÊNCIAS	34
	SEGUNDA PARTE	44
1.	INTRODUÇÃO	47
2.	MATERIAL E MÉTODOS	49
2.1.	Descrição do problema silvicultural	49
2.2	Simulador de instâncias operacionais - SIOP	53
2.3.	Constructive heuristic approach to scheduling silvicultural tasks and sequencing teams within time windows (CHESS-W)	55
2.4.	Cenário real aplicado de teste	60
3.	RESULTADOS	60
3.1.	Capacidade de uso do SIOP	60
3.2.	Performance e desempenho da heurística CHESS-W	63
4.	DISCUSSÃO	70
5.	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	73

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

As florestas plantadas representam cerca de 3% do total de florestas do globo, sendo que a maior parcela de plantações florestais está na América do Sul onde plantios de espécies exóticas como pinus e eucalipto representam 99% dessas áreas plantadas (FAO, 2020). O Brasil tem um papel crucial na expansão do setor na América do Sul. De acordo com o relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) publicado em 2023, que apresenta os indicadores do setor florestal no país, é possível verificar que a área de florestas plantadas no Brasil cresceu mais de 52,9% em 14 anos, passando de 6,5 milhões de hectares em 2008 para 9,9 milhões de hectares em 2022. No entanto, para atender à crescente demanda global projetada por produtos derivados de florestas plantadas, que deverá aumentar em 37%, alcançando 3,1 bilhões de m³ em 2050, será necessário aumentar a produtividade de 2,7 m³/ha para 7,22 m³/ha por ano, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (FAO, 2022). Contudo, os desafios da silvicultura para garantir uma alta performance produtiva são grandes, seja por fatores extrínsecos como variações de precipitações hídricas e de temperatura, aumento dos preços de insumos, ou por fatores intrínsecos, como o grande número de operações sequenciais com intervalos de tempo pré-estabelecidos por atividade, e entre as atividades, e por colaboradores que trabalham em equipes que podem ou não ser específicas de cada operação. A escassez de mão de obra para realização das operações silviculturais nos grandes polos florestais também é uma realidade no país. Dessa forma, o agendamento e sequenciamento ideal das operações silviculturais se apresenta como um problema de grande complexidade, pois além do grande número de pessoas e atividades, normalmente elas devem ser planejadas para um grande número de unidades de produção (talhões).

Sendo assim, de acordo com Framinan, *et al.* (2019) um dos desafios do agendamento das operações é a descrição do conjunto de recursos que podem executar as diferentes operações, e para as operações silviculturais há uma grande conexão em generalizar esses conjuntos pois as recomendações técnica/operacional com relação a ordem, sequência de operações, rendimento, tipo de recurso, pode variar muito entre as corporações. Problemas de agendamento com janelas de tempo, por sua vez, têm origem na filosofia *Just-in-Time* (JIT). Modelos de agendamento JIT usualmente consideram datas de vencimento dos trabalhos, penalizando tanto a antecipação quanto o atraso (Kramer, Lee, 1993). Um trabalho concluído antes da data de vencimento incorre em penalidade por antecipação, como custo de manutenção. Em contraste, trabalhos concluídos após o vencimento acarretam custo de atraso, como taxas de entrega expressa ou perda de vendas (Janiak *et al.*, 2015). Dentro da janela de tempo

estipulada, no entanto, o trabalho é considerado no prazo e não sofre penalizações. Caso contrário, a penalidade aplicada dependerá se o trabalho foi concluído antes ou depois da data final (Janiak *et al.*, 2015). Para garantir a qualidade operacional das atividades silviculturais, a priorização da janela de tempo de cada operação é essencial, sendo que o atraso ou antecipação podem gerar perdas efetivas na produtividade dessas florestas.

No entanto, à medida que os problemas florestais se tornaram mais complexos e envolvem um número cada vez maior de variáveis e combinações, métodos heurísticos ou aproximativos se apresentam como opções viáveis para resolução de problemas de alta complexidade e que demandem de grande esforço computacional para obtenção da solução ótima. Elas podem ser utilizadas para diferentes tipos de problemas, principalmente os de difícil análise (NP-*hard*) (Gogna; Tayal, 2013; Hertz; Widmer, 2003). Os algoritmos heurísticos são divididos em subcategorias: heurísticas construtivas e heurísticas de melhoria. Uma heurística construtiva atualiza iterativamente a solução (começando com uma solução vazia), tentando cada vez inserir o elemento mais promissor entre todos os admissíveis, até que a solução esteja completa (Bertagnon, 2021). Já as heurísticas de melhoria partem de uma solução admissível do problema e aplicam iterativamente uma série de modificações parciais com o objetivo de encontrar uma solução melhor (Cariou *et al.*, 2023).

A resolução do problema de otimização, em questão, por métodos exatos é um grande desafio, não apenas pela questão combinatória, mas também devido a exigência de um grande esforço computacional. Problemas dessa natureza, que envolvem regras rígidas de integração entre atividades e, por conseguinte, a minimização das rotas de deslocamento em janelas de tempo, exige procedimentos heurísticos próprios. A estruturação desses algoritmos não é uma operação simples, pois o aspecto fundamental é garantir a geração de uma solução factível e de qualidade. Contudo, nem sempre essa premissa é atendida, pois para atender essa condição é necessário utilizar o modelo exato de programação matemática. Além disso, não basta apenas ter o pseudo-código e sua estruturação, mas sim a realização de testes de validação que garantam a sua generalização em uma vasta aplicação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O setor brasileiro de floresta plantada

O total de florestas no mundo cobre pouco mais de 4 bilhões de hectares, de acordo com a publicação, *FRA-Global Forest Resources Assessment*, da FAO (2020), sendo Rússia, Brasil,

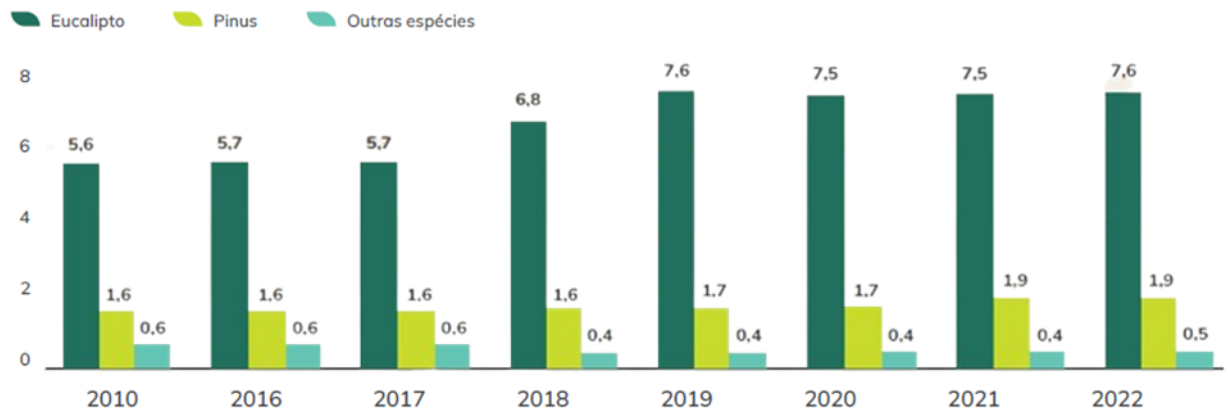
Canadá, Estados Unidos e China os países que mais contribuem com essa formação florestal, respectivamente. Juntos, eles contam com mais de 54% da área de florestas em todo o mundo. Apesar da perda florestal no planeta ser maior que 178 milhões de hectares desde 1990, de acordo com o relatório da FAO (2020), o mundo ainda possui pelo menos 1,11 bilhões de hectares de floresta primária – ou seja, florestas que não tiveram indício de atividades humanas e cujos processos ecológicos não foram significativamente perturbados. Combinados, três países – Brasil, Canadá e Rússia – abrigam 61% da floresta primária do mundo. Já as florestas plantadas representam cerca de 3% do total de florestas do globo, sendo que a maior parcela de plantações florestais está na América do Sul onde plantios de espécies exóticas como pinus e eucalipto representam 99% dessas áreas plantadas (FAO, 2020). O Brasil tem um papel crucial na expansão do setor na América do Sul.

O marco dessa expansão no Brasil ocorreu na década de 1960, com a criação do Programa Nacional de Reflorestamento (PNR), instituído pela Lei nº 5.106, de setembro de 1966. O objetivo do PNR era estimular a produção florestal no país, promovendo o uso sustentável das florestas e incentivando práticas de florestamento e reflorestamento para suprir a demanda por madeira, papel e outros produtos florestais. A referida lei permitia que empresas e pessoas físicas deduzissem até 50% do imposto de renda devido, desde que esses recursos fossem investidos em projetos de florestamento e reflorestamento (Soares *et al.*, 2014). Esses projetos precisavam ser aprovados pelo Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), responsável por sua fiscalização e garantia de que os recursos deduzidos eram devidamente aplicados.

Como resultado, a área de plantios florestais no Brasil cresceu de forma significativa: entre 1968 e 1973, de 100 a 250 mil hectares anuais, e entre 1974 e 1982, para cerca de 450 mil hectares anuais (Soares *et al.*, 2014). No ano de 1976 o Brasil era um dos quatro países que mais incentivavam a produção florestal, depois da China, União Soviética e Estados Unidos (Soares *et al.*, 2014). Ao todo, entre 1967 e 1986, os projetos vinculados aos incentivos fiscais somaram aproximadamente 6,2 milhões de hectares (Leão, 2000). Os incentivos foram extintos em 1988 devido a desvios de destinação dos recursos e deficiências técnicas na instalação. Mas mesmo com o fim, o programa embasou a criação no país de uma base legal para o desenvolvimento de florestas comerciais, o que se tornaria essencial para o crescimento do setor de florestas plantadas, especialmente no âmbito da celulose e papel, pois o setor continuou se desenvolvendo com as grandes empresas de base florestal dedicando-se à ampliação de sua área reflorestada ou incentivando o reflorestamento em pequenos e médios imóveis rurais.

De acordo com o relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) publicado em 2023, que apresenta os indicadores do setor florestal no país, é possível verificar que a área de florestas plantadas no Brasil cresceu mais de 52,9% em 14 anos, passando de 6,5 milhões de hectares em 2008 para 9,9 milhões de hectares em 2022 (Figura 1). O eucalipto foi o principal responsável por essa expansão, representando 76% da área plantada, seguido pelo pinus, com 19%. Os plantios de eucalipto estão localizados, principalmente, nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do país, com destaque para Minas Gerais (29%), Mato Grosso Sul (15%) e São Paulo (13%). Já os plantios de pinus predominam na região Sul, especialmente no Paraná, que possui 713 mil hectares (IBÁ, 2023).

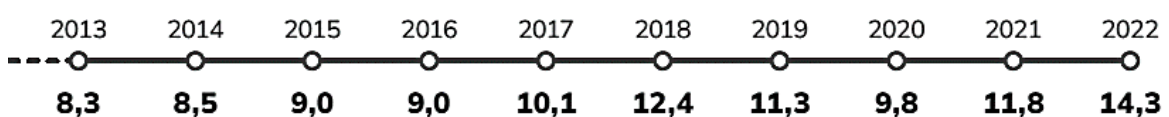
Figura 1 - Histórico de áreas plantadas no Brasil (milhões de hectares).



Fonte: IBÁ (2023).

Em 2023 o PIB do setor de florestas plantadas representou 1,3% do PIB nacional, ocupando o sexto lugar no ranking de atividades que contribuem para economia nacional quando considerado a parte industrial do setor. Além disso, o setor alcançou um recorde de exportações em 2022, com um crescimento de 21,3% (Figura 2) em relação ao ano anterior. Dentre os produtos exportados, a celulose se destacou, correspondendo a 59% do valor total de exportação do setor (IBÁ, 2023).

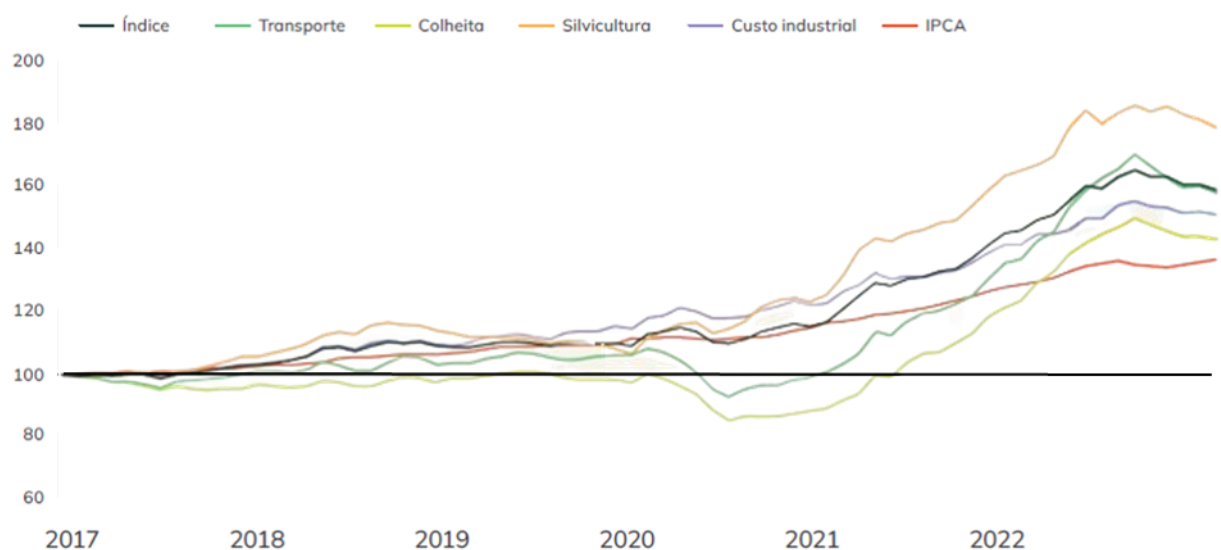
Figura 2 - Histórico de exportações do setor (US\$ bilhões).



Fonte: IBÁ (2023).

Apesar dos inúmeros avanços, o setor enfrenta grandes desafios, exacerbados pelas mudanças climáticas. De acordo com Grattapaglia (2022) o aumento das temperaturas e a alteração no regime hídrico têm favorecido a proliferação de pragas e doenças nas culturas agrícolas, impactando diretamente a produtividade. Além disso, as florestas plantadas estão se tornando mais vulneráveis a eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e tempestades, o que exige novas abordagens em termos de manejo e planejamento florestal sustentável (Gonçalves *et al.*, 2020). Outro desafio significativo é o aumento nos preços dos insumos, especialmente dos fertilizantes, que têm pesado sobre o custo de produção. A invasão da Ucrânia pela Rússia em 2022 exacerbou essa situação, interrompendo o fornecimento global de fertilizantes, já que a Rússia e a Belarus eram responsáveis por uma parcela significativa das exportações globais de potássio e outros nutrientes essenciais. Segundo publicações de World Economic Forum (2023) e St. Louis Fed (2022), o conflito elevou os preços dos fertilizantes a níveis recordes, principalmente devido às sanções econômicas e à incerteza no mercado de transporte, o que impacta diretamente a cadeia produtiva do setor florestal no Brasil, que depende fortemente das importações desses insumos. Por meio da Figura 3 é possível observar os efeitos desse conflito caracterizados pelo aumento substancial do custo de formação florestal (silvicultura) a partir do ano de 2021.

Figura 3 - Índice de custo do setor florestal (janeiro 2017 = 100).



Fonte: IBÁ (2023).

Apesar desses desafios, o setor tem investido em avanços genéticos para desenvolver materiais mais resilientes às condições climáticas adversas. Conforme descrito por Gonçalves *et al.* (2020), a biotecnologia florestal e a seleção genética estão ajudando a desenvolver variedades de eucalipto mais tolerantes ao estresse hídrico e a pragas, o que pode reduzir as perdas de produtividade agravadas por esses eventos extremos. Esses esforços são fundamentais para mitigar os impactos das mudanças climáticas e garantir a sustentabilidade econômica e ambiental das plantações no Brasil (Grattapaglia, 2022). As grandes empresas do setor também têm intensificado suas parcerias com instituições públicas, aumentando os investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D). De acordo com a IBÁ (2023), o investimento em inovação, P&D e em aspectos socioambientais do setor cresceu 4% em 2022, em comparação ao ano anterior.

O uso de novas tecnologias embarcadas tem revolucionado toda a cadeia produtiva florestal, com impactos significativos desde os viveiros até as operações de colheita e logística. Nos viveiros clonais, a adoção de sensores de alta precisão para o controle do microclima nas estufas assegura às mudas condições ideais para cada estágio fenológico, conforme evidenciado por Shamshiri (2018). O uso de controladores lógicos programáveis (CLP) são empregados para a dosagem precisa de insumos, segmentando setores e aplicando nutrientes de forma automatizada e integrada. De acordo com Shamshiri *et al.* (2021) essa integração permite incorporar os dados coletados a modelos ou algoritmos de inteligência artificial de forma que comandos de controle específicos, como acionar bombas específicas ou alternar outros processos, sejam enviados para alterar o ambiente da estufa. Além disso, sistemas de plantio robotizado, juntamente com a seleção automatizada de mudas utilizando visão computacional e sensores multiespectrais são avanços tecnológicos que permitem não só a padronização das operações, mas também a rastreabilidade dos lotes de mudas por meio de RFID *tags* ou códigos QR, integrando o ciclo produtivo com sistemas de gestão florestal.

Nas atividades silviculturais, os avanços incluem sensores de bordo e sistemas telemáticos instalados em máquinas e implementos, permitindo a coleta de dados e monitoramento das operações em tempo real (*real-time*). De acordo com Soares (2023), caso o gestor perceba desvio operacional, é possível contatar o operador no mesmo momento para verificar o que está acontecendo e solucionar a questão. Além disso, o uso de drones e veículos aéreos não tripulados (VANTs) para aplicação de insumos e a liberação de agentes biológicos, como inimigos naturais, para o controle de pragas e plantas daninhas tem se tornado uma prática de campo. Segundo Tsouros *et al.* (2019) uma aeronave tem a capacidade de pulverizar a

quantidade apropriada de herbicida espacialmente, ajustando sua altura e permitindo uma aplicação mais precisa e localizada, o que reduz os impactos ambientais e aumenta a eficiência.

Adicionalmente, o monitoramento florestal avançou com o uso de imagens de satélite, câmeras térmicas de alta resolução e escaneamento laser (LIDAR) acoplados a drones, que, integrados a sistemas de georreferenciamento e inteligência artificial (IA), possibilitam a análise contínua e detalhada das áreas plantadas, detecção de incêndio e monitoramento de pragas. Dados de LIDAR podem ser usados para estimativas de alta resolução gerando modelos digitais de elevação do terreno, bem como altura e diâmetro de árvores individuais (Sankey *et al.*, 2017a, 2011b). Dados hiperespectrais têm sido comumente usados para classificar a vegetação no nível de espécie e detectar espécies-alvo (Noujdina e Ustin, 2008, Sankey *et al.* 2017). Juntos, podem oferecer capacidades únicas e sinérgicas, alavancando as estimativas vertical e horizontalmente explícitas de cada fonte de dados (Sankey *et al.*, 2017). Esses dados alimentam modelos preditivos e bancos de dados integrados, transformando informações brutas em indicadores estratégicos para a tomada de decisão. A modelagem florestal e o uso de *big data analytics* permitem simulações e previsões que auxiliam no manejo sustentável das florestas plantadas, otimizando desde o cronograma de operações até a produtividade de longo prazo.

Nas operações de colheita florestal e logística, o uso de sensores e controladores avançados de bordo em máquinas e caminhões florestais é uma realidade consolidada conforme constatado por Choudhry e O'Kelly (2018). Os dados de produção são vinculados a um GPS e retransmitidos de volta para o escritório, juntamente com dados sobre a produtividade da máquina e outros indicadores de desempenho, como eficiência de combustível, que permitem à gestão acompanhar e monitorar as atividades em tempo real. O planejamento dessas atividades é conduzido por *softwares* de otimização baseados em programação linear e algoritmos heurísticos, garantindo soluções otimizadas para cada etapa do processo logístico e operacional, maximizando a eficiência e sustentabilidade das operações.

O futuro do setor florestal, especialmente no Brasil, apresenta grande potencial de crescimento, com a produtividade das florestas plantadas desempenhando um papel central. Segundo Payn *et al.* (2015), a América do Sul possui as maiores taxas potenciais de produtividade, alcançando 24 m³/ha por ano em florestas plantadas. Entre 2014 e 2020, o Brasil superou essas expectativas, com a produtividade do eucalipto e do pinus atingindo 35 e 30 m³/ha por ano, respectivamente, graças à adoção de tecnologias clonais, melhorias na fertilização e silvicultura, bem como avanços em técnicas de colheita (IBÁ, 2021). No entanto, para atender à crescente demanda global projetada por produtos derivados de florestas plantadas, que deverá

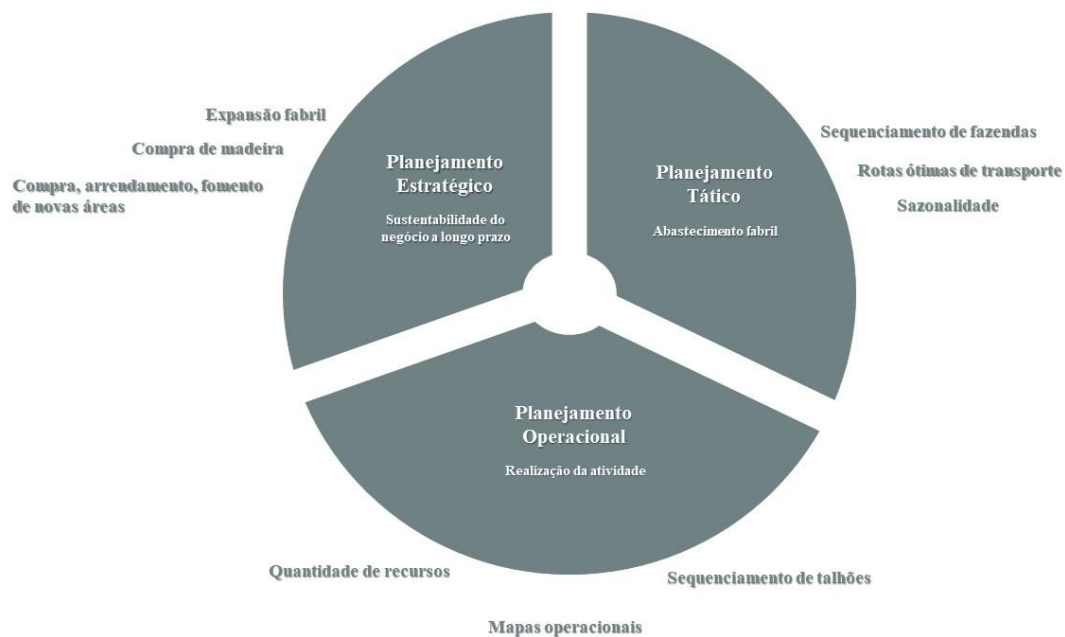
aumentar em 37%, alcançando 3,1 bilhões de m³ em 2050, de acordo com o relatório *Global forest sector outlook 2050* publicado pela FAO (2022). Especialmente em regiões tropicais e subtropicais, será necessário aumentar a produtividade de 2,7 m³/ha para 7,22 m³/ha por ano, além de utilizar eficientemente os resíduos de madeira (FAO, 2022). Países com setores florestais bem desenvolvidos, como o Brasil, estão em uma posição privilegiada para atender à crescente demanda por produtos florestais, ao mesmo tempo em que promovem a sustentabilidade ambiental por meio do armazenamento de carbono em produtos de madeira (Maximo *et al.*, 2022). Assim, o setor florestal brasileiro deverá continuar a se expandir, integrando práticas sustentáveis e inovadoras para garantir a competitividade no cenário global.

2.2 Planejamento e tomada de decisão em ativos florestais

O planejamento florestal é definido por Bettinger e Sessions (2001) como o processo de identificação prévia das atividades integradas a serem implementadas ao longo do tempo em uma determinada área. Esse planejamento é baseado na definição de metas para períodos de tempo específicos, considerando previsões de mercado, estoque e recursos disponíveis (Gomide, 2009). No planejamento da produção, o estabelecimento, avaliação e seleção de metas, assim como a criação de planos alternativos, são destacadas como etapas essenciais do processo (Banhara, 2009). A interdependência entre diferentes níveis temporais e espaciais no processo de tomada de decisão, juntamente com a variação no escopo das atividades, estabelece a hierarquia do planejamento florestal em três níveis: estratégico, tático e operacional (Bettinger *et al.*, 2015). Sendo o desafio do planejamento hierárquico determinar como fazer boas ligações entre os diferentes níveis de planejamento, de modo que as decisões operacionais não sejam de curto prazo e que os planos estratégicos sejam viáveis operacionalmente (Borges *et al.*, 2014).

À medida que a tomada de decisão se desloca do nível estratégico para o operacional, a complexidade dos modelos matemáticos utilizados aumenta reduzindo o nível de incertezas pelo aumento do detalhamento das informações (Santos, 2019). O planejamento estratégico abrange a sustentabilidade do negócio e decisões de longo prazo como projetos de expansão fabril, novos modais de transporte, estratégias de novos arrendamentos, venda e compra de madeira; o planejamento tático é um refinamento do plano estratégico e foca em decisões de médio prazo, como a formação dos blocos de colheita e transporte, sequenciamento de fazendas, considerando fatores de sazonalidade e melhorias de rotas para transporte de madeira; enquanto o planejamento operacional ou de curto prazo trabalha com o horizonte anual, realizando a programação e garantindo a execução das atividades junto da operação (Figura 4).

Figura 4 - Níveis hierárquicos do planejamento.



Fonte: do Autor (2025).

Nesse contexto, a *Wood Supply Chain* (cadeia de fornecimento de madeira) representa um sistema complexo, dinâmico e inter-relacionado, composto por fluxos de materiais, serviços, informações e financiamentos entre diversos agentes (Kogler e Rauch, 2023; Kogler, 2020). Essa cadeia envolve a gestão e movimentação da madeira desde o plantio até o consumidor final, passando por etapas fundamentais como colheita, transporte, processamento e entrega. A integração entre os níveis de planejamento dentro dessa cadeia é crucial para o sucesso do setor florestal, pois garante que os recursos sejam utilizados de maneira eficiente e sustentável ao longo do tempo.

A gestão da cadeia de suprimento de madeira envolve decisões que abrangem o planejamento, o projeto, a operação, o controle e o monitoramento de toda a cadeia, incluindo as fases de crescimento, colheita, extração, transporte, armazenamento, processamento e reuso da madeira (Kogler e Rauch, 2018a, 2023b). Hirsch e Gronalt (2013) propuseram uma abordagem de planejamento em três estágios que aborda o problema do transporte, a suavização de ordens de transporte de madeira e o problema de roteamento de veículos. Já Kogler *et al.* (2021) formularam modelos de programação inteira mista aplicados ao transporte de madeira em tora e à indústria madeireira para observar os efeitos de decisões individuais e coordenadas ao longo da cadeia de suprimento de madeira. Esses modelos permitiram identificar estratégias

de redução de custos de aquisição, como transporte coordenado, cadeias de suprimento integradas, aumento da carga útil dos caminhões e o uso de pátios satélites (Kogler e Rauch, 2023).

O planejamento estratégico é fundamental para a tomada de decisões que garantam a sustentabilidade do negócio e orientem as estratégias de crescimento da organização. Esse nível de planejamento responde a questões críticas, como a demanda de terra e madeira necessária para o suporte das unidades fabris ao longo do horizonte de planejamento, a expansão ou aumento da capacidade produtiva, a escolha de diferentes modais de transporte e a consideração de critérios ambientais, como a absorção de carbono. Além disso, o planejamento estratégico aborda aspectos clássicos, como a busca por uma floresta normal e o fluxo uniforme de produção, essenciais para uma floresta regulada (Belavenutti *et al.*, 2019). Por lidar com um horizonte de longo prazo, que pode abranger de dois a quatro ciclos de produção, o planejamento estratégico tende a ser menos detalhado, focando em metas e estratégias amplas. Ele reflete tanto a eficácia (alcance das metas) quanto a eficiência (melhor desempenho, ou seja, relação custo-benefício) das operações florestais (Bateman e Snell, 1998).

Ezquerro *et al.* (2024) propuseram uma nova abordagem para o planejamento estratégico na floresta de Valsain, na Espanha, chamada *Improved Forest Management* (IFM). Esse modelo foi comparado ao tradicional *Business As Usual* (BAU), incorporando práticas de manejo voltadas para o sequestro de carbono e a conservação da biodiversidade. A principal diferença entre os dois cenários está na flexibilidade das práticas silviculturais. Utilizando o método de *Lexicographic Goal Programming* (LGP), com uma função multiobjetiva, o IFM incluiu restrições relacionadas ao volume de corte, captura de carbono, áreas proibidas de corte e conservação de árvores em pé. Enquanto o BAU atendeu às metas de colheita de madeira e captura de carbono, no entanto, houve conflitos entre a conservação da biodiversidade e o sequestro de carbono. Já o IFM, apresentou colheita de volume menor em comparação com o BAU mas proporcionou um aumento na captura de carbono não decrescente ao longo dos anos e uma melhor otimização da biodiversidade.

No contexto brasileiro, Belavenutti *et al.* (2019) exploraram a integração dos modelos estratégico e tático para o plantio de pinus no sul do Brasil, utilizando a modelagem *Goal Programming* (GP) com múltiplos objetivos, como Valor Presente Líquido (VPL), volume total de madeira e distribuição de idade. Foram testadas duas abordagens: *Top-Down Approach*, onde o planejamento estratégico e o tático são realizados em fases distintas, e *Integrated Approach*, onde ambos os níveis são resolvidos simultaneamente. Restrições importantes foram aplicadas, como a alocação de cada parcela florestal a uma única prescrição de manejo, limites de volume

de madeira por período, e restrições espaciais e de conectividade para otimizar os custos logísticos e garantir a continuidade das áreas colhidas. Os resultados mostraram que, embora ambas as abordagens tenham sido eficientes, a abordagem integrada proporcionou melhores resultados na conectividade das áreas de colheita, um fator crucial para a operacionalização. Em termos de critérios estratégicos, ambas as abordagens tiveram desempenho semelhante, mas com pequenas variações no fluxo de volume comercial e nos custos operacionais.

O plano tático usualmente reflete os primeiros 2 a 5 anos do plano estratégico, proporcionando um detalhamento e operacionalização das atividades previstas. Nesse processo, os objetivos estratégicos são transformados em metas mensais, semestrais ou anuais, que orientam o sequenciamento das operações de colheita e transporte, além de dimensionar os recursos e equipamentos necessários (Banhara, 2009). Esse nível de planejamento requer um maior detalhamento das informações inseridas no modelo, podendo incluir restrições relacionadas à sazonalidade, aspectos espaciais, níveis de criticidade operacional, construção e manutenção de estradas, definição do tipo de manejo para o próximo ciclo, identificação de rotas otimizadas e alcance de metas de produção volumétrica. Além disso, também envolve a indicação dos projetos que serão cortados para o fornecimento de madeira, buscando aumentar a conectividade, reduzir o impacto ambiental e minimizar os custos associados à colheita.

Rijal *et al.* (2020) apresentaram três modelos de planejamento de colheita em nível tático aplicados a uma região de florestas estaduais em Quebec. O Modelo A, tradicionalmente utilizado no manejo florestal canadense, baseia-se nos princípios de rendimento sustentado, com o objetivo de maximizar o volume de colheita e garantir um fluxo contínuo de madeira ao longo do horizonte de planejamento. O Modelo B é integrado e busca maximizar o valor presente líquido (VPL) da cadeia de suprimentos como um todo, englobando todas as usinas consumidoras da madeira proveniente dessa área florestal. Por sua vez, o Modelo C, também integrado, maximiza o VPL considerando submodelos individuais de cada indústria consumidora. Nesse modelo, o fluxo de madeira é alocado sequencialmente, priorizando os produtos de maior valor e garantindo que as usinas que produzem esses produtos recebam maior atenção. O Modelo C demonstrou ser superior aos outros dois em termos de receita líquida e eficiência da cadeia de suprimentos florestal, além de reduzir a discrepância entre os cortes anuais permitidos (AAC) e o volume colhido de forma lucrativa. Isso promoveu um fluxo sustentável de produtos de maior valor, como madeira serrada, ao longo do horizonte de planejamento.

Em outro estudo, Ferreira *et al.* (2019) testaram seis cenários diferentes de suprimento de madeira proveniente de fomentos florestais em três estados brasileiros, avaliando cinco

sistemas de transporte, levando em conta os custos de produção de madeira, restrições como capacidade de armazenamento, demanda futura e a capacidade máxima de contratação de apoio técnico aos produtores florestais. Os resultados mostraram que o menor custo de produção de madeira foi obtido no cenário sem restrições ambientais ou de capacidade de transporte. À medida que mais restrições foram adicionadas nos cenários subsequentes, o custo de produção aumentou. O cenário com maior custo foi aquele que apresentou uma diversificação dos sistemas de transporte e inclusão de restrições na capacidade de assistência técnica. No que se refere ao transporte, o sistema rodoviário direto (DRT) mostrou-se o mais econômico, enquanto o sistema combinado rodoviário e marítimo (RMT) apresentou os maiores custos, devido aos elevados custos fixos. No entanto, o RMT poderia se tornar competitivo com o aumento do volume de madeira transportada, diluindo os custos fixos.

Rodrigues *et al.* (2006) compararam os modelos de otimização tipo I e tipo II em relação às restrições de recobrimento para regular a produção de madeira em colheitas previstas para ocorrer entre 5 e 7 anos, sem exceder os limites de produção. O modelo tipo I manteve a integridade das unidades de manejo, mas resultou em um número maior de variáveis de decisão. Já o modelo tipo II, que permitiu o fracionamento das áreas, apresentou uma solução menos conservadora, embora tenha gerado desafios operacionais. O fracionamento das unidades de manejo exigiu ajustes que complicaram a implementação prática do plano de manejo. Embora o modelo tipo II tenha proporcionado uma função objetivo ligeiramente superior, sua aplicação prática foi mais complexa devido aos problemas operacionais associados ao fracionamento das áreas.

Considerando a integração de planos, o planejamento tático não se destina diretamente à implementação das atividades. Ele orienta, de forma geral, onde e quando as atividades devem ocorrer, sem, no entanto, detalhar como elas serão executadas (Bettinger *et al.*, 2009). Esse nível de detalhamento é uma atribuição do planejamento operacional, que foca no primeiro ano do horizonte do planejamento tático. Em uma escala temporal ainda mais específica, o planejamento operacional pode incluir atividades diárias, semanais ou mensais, abrangendo orçamentação, alocação de recursos e logística específica de cada projeto, de acordo com a complexidade da operação (Bettinger *et al.*, 2009). Nesse contexto, as operações são tratadas de maneira individualizada, pois o plano operacional tem a função de identificar os procedimentos e processos detalhados para os níveis hierárquicos inferiores da organização (Mitchell, 1996).

No âmbito da silvicultura, colheita e transporte, o foco recai sobre tarefas rotineiras. Por isso, os planos operacionais são desenvolvidos separadamente para cada atividade. Cada uma

delas demanda diferentes recursos, planejamento de rotas, dimensionamento de maquinário e otimização de rendimentos, além de se referirem a localizações distintas. Embora esses planos operacionais sejam de curto prazo e altamente detalhados, sua complexidade exige atualizações frequentes para refletir as condições reais e dinâmicas do campo. Esses ajustes nos planos, à medida que são executados, não são apenas comuns, mas também necessários. O avanço dos sistemas de telemetria e monitoramento em tempo real tornou a obtenção de informações operacionais muito mais eficiente, permitindo correções rápidas nos planos operacionais. Fatores estocásticos, como intempéries climáticas ou imprevistos operacionais, podem exigir revisões imediatas. No entanto, se muitas alterações forem necessárias, principalmente devido à falha do planejamento em reconhecer certos atributos ou limitações do sistema operacional, deve-se considerar a adoção de métodos de planejamento mais robustos, que representem esses fatores de maneira mais eficiente (Bettinger *et al.*, 2009). Nessa perspectiva, é crucial fortalecer a integração entre o planejamento e a operação, de modo que os desvios sejam rapidamente identificados e corrigidos. Essa comunicação ágil e precisa é de extrema importância para o sucesso da organização.

O estudo desenvolvido por Rönnqvist (2023) apresentou uma série de 33 problemas típicos de planejamento encontrados na indústria de produtos florestais, destacando o tempo disponível para resolver cada um desses problemas. O autor observou que, enquanto os problemas de planejamento operacional geralmente precisam ser resolvidos rapidamente, em questão de segundos ou minutos, os problemas de planejamento estratégico podem ser solucionados em períodos de tempo mais longos, às vezes levando várias horas. Por essa razão, heurísticas, meta-heurísticas e métodos de redes de fácil resolução são comumente aplicados a problemas operacionais, de forma a acelerar a geração de resultados, enquanto a Programação Inteira Mista (MIP) é frequentemente utilizada para problemas estratégicos (D'Amours *et al.*, 2010).

Diante da complexidade dos problemas, do elevado número de variáveis, da necessidade de respostas rápidas, da diversidade de modelos e do grande volume de dados para alimentar esses sistemas, o uso de Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) torna-se uma ferramenta essencial para os gestores florestais na resolução de questões complexas de tomada de decisão (Barros Junior, 2010). Esses sistemas são baseados em softwares que integram ferramentas de simulação, sistemas de informações geográficas, métodos de pesquisa operacional, algoritmos de gerenciamento e otimização de bancos de dados (Muys *et al.*, 2010). Tais ferramentas têm se destacado em diversos campos de aplicação, especialmente no manejo e planejamento florestal (Segura; Ray; Maroto, 2014).

Palmgren *et al.* (2003a, 2004b) desenvolveram um método de *Branch & Price* para resolver uma formulação baseada em rotas, utilizando um tipo específico de caminhão e um horizonte de planejamento diário. O subproblema de localização de rotas foi resolvido com base em uma variedade de heurísticas (D'Amours *et al.*, 2010). De forma semelhante, Weintraub *et al.* (1996) desenvolveu um trabalho utilizando modelos heurísticos baseados em simulação para otimizar a programação diária de caminhões madeireiros. A partir desse estudo, foi construído um Sistema de Suporte à Decisão (SSD), que recebeu o Prêmio Franz Edelman em 1998 e passou a ser amplamente utilizado por diversas empresas florestais no Chile e em outros países da América do Sul (D'Amours *et al.*, 2010).

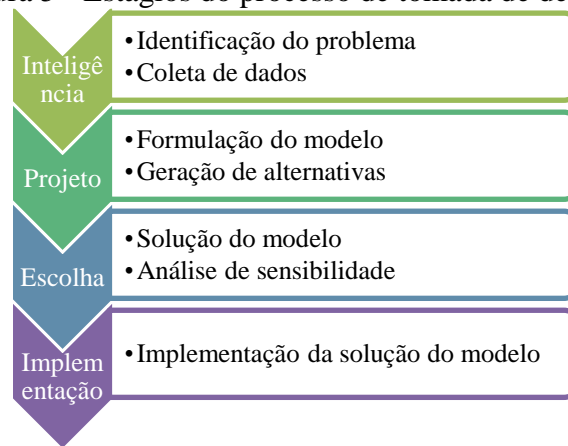
A utilização de softwares embasados em pesquisa operacional acoplados a uma interface mais familiarizada por meio de SSD's vem para sistematizar o processo de tomada de decisão proporcionando aos gestores maior confiabilidade. Isso ocorre porque esses sistemas combinam ferramentas intuitivas com modelos matemáticos que geram soluções ótimas ou próximas do ideal, facilitando a tomada de decisões mais embasadas e eficientes. De acordo com Turban e Aronson (1998), o processo de tomada de decisão é composto por quatro fases: inteligência, projeto, escolha e implementação (Figura 5). A fase de inteligência consiste na definição e identificação do problema, sendo a coleta de dados e informações uma das principais atividades dessa etapa, essencial para a formulação clara do problema (Rodrigues, 2001). Os profissionais envolvidos devem conceber o problema de forma clara e coerente, definindo os objetivos almejados e as possíveis alternativas para seu alcance. Além disso, é necessário levantar as restrições técnicas e analisar o inter-relacionamento das variáveis envolvidas. Nessa fase, a análise cuidadosa do problema é crucial para o sucesso nas etapas seguintes (Exler e Bandeira, 2010).

Na fase de projeto, constrói-se o modelo por meio da determinação de um conjunto de relações matemáticas. Quando fundamentado em pesquisa operacional, esse modelo é composto por uma função objetivo e funções de restrição. A validação do modelo conclui essa etapa, e pode demandar a coleta de mais informações ou a redefinição do problema, se necessário (Turban e Aronson, 1998). Um bom modelo deve gerar resultados próximos à realidade, favorecendo validações mais precisas (Exler e Bandeira, 2010).

Na fase de escolha, são selecionadas uma ou mais alternativas geradas na fase de projeto. Testes de sensibilidade são realizados com dados históricos para verificar a acurácia e precisão do modelo, comparando-os ao comportamento operacional real. Caso os desvios identificados sejam aceitáveis, o modelo passa para próxima fase, caso contrário, a modelagem deverá ser revisada, com a inclusão de novas restrições para melhorar o comportamento do modelo. Por

fim, a fase de implementação revela a solução definitiva para o problema (Turban e Aronson, 1998). É fundamental monitorar e analisar os resultados propostos pelo modelo. Se os resultados não forem satisfatórios, deve-se revisitar as etapas anteriores para localizar pontos de melhoria e otimizar a solução (Rose, 1999).

Figura 5 - Estágios do processo de tomada de decisão.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2001).

2.3 Pesquisa Operacional

A origem da Pesquisa Operacional (PO) se deu durante a segunda guerra mundial onde foram desenvolvidos modelos para serem aplicados a problemas consequentes da guerra, de natureza logística, operações táticas e planos estratégicos militares, visando situações de alocação de recursos variados, principalmente em condições de escassez (Belfiore e Fávero, 2013). Devido à sua versatilidade, a PO passou a ser aplicada a vários tipos de problemas dos setores público e privado, comercial, industrial e governamental (Arenales *et al.*, 2015). Segundo Buongiorno e Gilless (2003), a primeira aplicação no setor florestal foi utilizando a Programação Linear na década de 60. A PO evoluiu muito ao longo dos anos e conta com inúmeras ferramentas de ampla aplicabilidade, como se pode verificar no Quadro 1. De acordo com Akay *et al.* (2013), Belavenutti; Romero e Diaz-Balteiro (2018), as técnicas com algoritmos exatos (Programação Linear e Programação Inteira Mista) e com algoritmos aproximativos (Meta-heurísticas) são as que mais se destacam na resolução de problemas florestais e de otimização combinatória.

Quadro 1 - Ferramentas de Pesquisa Operacional.

Modelos Determinísticos	Programação Linear Programação em Redes Programação Inteira e Mista Programação Não-Linear Programação Dinâmica
Modelos Estocásticos	Teoria das Filas Modelos de Simulação Programação Dinâmica Estocástica Teoria dos Jogos
Outras técnicas	Metodologia Multicritério de Apoio e Decisão (AHP) Análise Envoltória de Dados Inteligência Artificial Inteligência Computacional Heurística e Meta-heurística Outros

Fonte: Adaptado de Belfiore e Fávero (2013).

Por gerar soluções exatas, a programação linear é classificada como um método determinístico. A denominação linear implica que a função objetivo e as restrições sejam necessariamente funções lineares, sendo representadas por meio de sistemas de igualdades ou desigualdades, com variáveis apresentando expoentes iguais a 1 (Menon, 2005). O algoritmo mais difundido de PL é o Simplex proposto por Dantzig em 1947. A solução desse método se dá por meio de iterações que tem como ponto de partida uma solução inicial factível, buscando a cada iteração uma nova solução viável adjacente que apresente melhores valores na função objetivo, até obter o valor ótimo (Belfiore e Fávero, 2013; Barbosa; Gomes; Chaves, 2017). Esses modelos têm como meta encontrar a melhor solução do *pool* de alternativas de manejo de uma floresta, sendo que a existência de restrições conflitantes pode ser melhor balanceada pelo uso dessa técnica (Boyland *et al.* 2004).

Tendo em vista que a definição do tipo de programação a ser utilizada é delineada exclusivamente pela natureza da variável (Gomide, 2009), uma das limitações do uso da PL é que nem sempre elas serão de natureza contínua. Quando forem de natureza inteira ou binária o modelo assume característica de Programação Linear Inteira (PLI), caso o problema apresente variáveis inteiras e contínuas, o modelo é denominado de Programação Linear Inteira Mista

(PLIM). Os problemas de PLIM envolvem técnicas de resolução enumerativas, algoritmos construtivos e algoritmos de corte, sendo o mecanismo de busca mais popular o algoritmo *branch-and-bound* desenvolvido por Land e Dong em 1960 (Rossi *et al.*, 2006). A ideia desse algoritmo é dividir todos os candidatos da solução em subconjuntos, ou seja, contrair a região factível para eliminar subconjuntos de candidatos inviáveis e não inteiros, e delimitar, à medida que se encontram boas soluções no conjunto de divisões, através de comparações com soluções de outros subproblemas utilizando os limites superior e inferior da quantia otimizada (Gomide, 2009; Oliveira, 2021).

No setor florestal, a aplicação da pesquisa operacional teve início na década de 1950 com o trabalho de Paull (1956). Nesse estudo, ele discutiu o uso da Programação Linear (PL) na programação de corte e transporte, em um projeto desenvolvido pela empresa canadense Abitibi. Na sequência, Balas (1963) aplicou a PL em projetos de redes viárias voltadas para áreas de colheita florestal. Durante a década de 1970, o uso do algoritmo simplex e de geradores de matrizes para resolver problemas de gerenciamento florestal começou a ganhar espaço. Nesse mesmo período, o Serviço Florestal dos Estados Unidos adotou um modelo de simulação determinística para avaliar diferentes opções de corte, com o objetivo de maximizar as vendas de madeira (Rönnqvist *et al.*, 2023).

Os modelos foram sendo aprimorados ao longo do tempo, especialmente com o desenvolvimento e a comercialização de solucionadores mais avançados, como o Cplex, para resolver problemas de Programação Linear (PL) e Programação Linear Inteira (PLI) na década de 1980 (Rönnqvist *et al.*, 2023). A década de 1990 trouxe consigo o desenvolvimento de Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), o que possibilitou a incorporação de variáveis estocásticas, permitindo a resolução de problemas maiores e mais complexos (Alonso-Ayuso *et al.*, 2011; Veliz *et al.*, 2015). Nessa época, também foram desenvolvidas modelagens que impuseram restrições de adjacência, limitando o tamanho dos blocos de colheita para atender a preocupações ambientais (Rönnqvist *et al.*, 2023).

Na década de 2000, conceitos de gerenciamento da cadeia de suprimentos e de valor foram introduzidos em vários setores industriais. Isso permitiu a adoção de uma abordagem mais sistemática e holística no suporte ao planejamento integrado, abrangendo diversas atividades florestais (Rönnqvist *et al.*, 2023). Nos últimos anos, houve um aumento na utilização de modelos estocásticos e de múltiplos objetivos, refletindo a crescente complexidade da tomada de decisões em um ambiente que considera fatores como incertezas do mercado e o crescimento das árvores (Alonso-Ayuso *et al.*, 2011; Veliz *et al.*, 2015). No entanto, à medida que os problemas florestais se tornaram mais complexos e envolviam um

número cada vez maior de variáveis e combinações, métodos heurísticos ou aproximativos se apresentaram como opções viáveis para resolução de problemas de alta complexidade e que demandem de grande esforço computacional para obtenção da solução ótima. Problemas com grande número de variáveis e combinações podem chegar a ficar horas ou dias sendo processados por modelos determinísticos e ao final, pode não encontrar uma solução ótima. Em tais situações uma boa solução viável pode ser obtida pela aplicação de métodos heurísticos bem elaborados (Hillier e Lieberman, 2005).

As heurísticas são classificadas como métodos de otimização combinatórias e são utilizadas para encontrar boas soluções com menor esforço computacional. Podem ser utilizadas para diferentes tipos de problemas, principalmente os de difícil análise (Gogna; Tayal, 2013; Hertz e Widmer, 2003). Os algoritmos heurísticos são divididos em outras subcategorias: heurísticas construtivas e heurísticas de melhoria. Uma heurística construtiva atualiza iterativamente a solução (começando com uma solução vazia), tentando cada vez inserir o elemento mais promissor entre todos os admissíveis, até que a solução esteja completa (Bertagnon, 2021). Já as heurísticas de melhoria partem de uma solução admissível do problema e aplicam iterativamente uma série de modificações parciais com o objetivo de encontrar uma solução melhor (Cariou *et al.*, 2023).

Da progressão dos métodos heurísticos foram desenvolvidas as meta-heurísticas que são algoritmos mais iterativos, completos e mais robustos, onde cada iteração envolve a busca de uma solução melhor que a solução anterior (Binoti, 2010). Essa maior robustez se dá por examinar o espaço de busca de maneira inteligente incorporando mecanismos de fuga de ótimos locais, armazenando informações que podem ser úteis na busca de soluções viáveis, a fim de melhorar a qualidade do resultado final, chegando o mais próximo possível do ótimo global (Blum; Roli; Alba, 2005; Cruz, 2015). Mas como esses métodos não são capazes de certificar que a solução encontrada é a ótima global, a comparação com procedimentos exatos permite mensurar a distância entre o ótimo global e o melhor resultado heurístico (Gomide, 2009).

De acordo com Rebello e Humacher (2000), algumas meta-heurísticas, por exemplo, como os algoritmos genéticos (GA), *simulated annealing* (SA) e colônia de formigas (ACO) foram inspirados na física, biologia, ciências sociais e estão numa área limite entre a pesquisa operacional e a inteligência artificial, com aplicações em vários problemas de otimização. A técnica de Busca Tabu (TS), uma outra meta-heurística, tem sido utilizada para otimizar a localização de áreas de corte e manchas de habitat, maximizar o fluxo de volume de madeira e realizar otimizações em nível de paisagem em florestas mistas (Ramírez *et al.*, 2021; Bettinger *et al.*, 2007).

Cyr *et al.* (2017) utilizaram técnicas de SA e programação inteira mista (MIP) de forma sequencial para avaliar os efeitos de incêndios florestais e da preservação do habitat da vida selvagem sobre o nível de colheita. Esse estudo foi conduzido em uma área variando de 50 a 1.000 km², com restrições de adjacência. O modelo de unidade restrita (URM) foi utilizado para controlar a forma das unidades de colheita, minimizando a razão perímetro/área. A pesquisa demonstrou que a combinação de heurísticas e modelos exatos pode ser altamente vantajosa na elaboração de cronogramas de colheita espacialmente restritos, levando em consideração as necessidades da fauna e maximizando o corte anual permitido (Baskent, 2024).

Um exemplo interessante do uso de algoritmos genéticos é encontrado no estudo de Fotakis *et al.* (2012). Esse estudo utilizou algoritmos genéticos para otimizar a colheita de madeira, minimizando a sedimentação no escoamento da água e, assim, preservando a qualidade hídrica e evitando a erosão do solo. O algoritmo foi capaz de posicionar estrategicamente antigos povoamentos florestais próximos a cursos d'água, reduzindo significativamente os níveis de sedimentação. Essa abordagem gerou uma frente de Pareto de soluções não dominadas, demonstrando o equilíbrio entre a colheita de madeira e a conservação do solo, fornecendo insights importantes para o planejamento florestal espacial (Baskent, 2024).

O algoritmo de colônia de formigas (ACO) foi testado na otimização dos padrões de colheita em paisagens florestais por meio do estudo de Zeng *et al.* (2007), onde o objetivo principal do trabalho era minimizar o risco de danos causados pelo vento e garantir um fluxo sustentável e consistente de colheitas periódicas. O estudo mostrou que o ACO apresentou um desempenho satisfatório, mantendo uma distribuição relativamente uniforme das colheitas e reduzindo o risco de danos causados pelo vento. Contudo, assim como outros algoritmos heurísticos, o ACO mostrou-se sensível aos parâmetros que regem as atualizações de feromônio e a seleção dos cronogramas (Baskent, 2024).

2.4 Problemas de agendamento de atividades e as aplicações florestais

De acordo com Allahverdi *et al.* (2008), a primeira abordagem sistemática para problemas de agendamento foi realizada em meados da década de 1950. O problema de escalonamento ou *scheduling problem* em Pesquisa Operacional é uma área de estudo focada na otimização da alocação de tarefas em um conjunto de recursos limitados ao longo do tempo, de forma que todas as restrições sejam atendidas e o critério de otimização seja maximizado ou minimizado (Józefowska, 2007). Como o agendamento lida com a alocação de operações para

recursos ao longo do tempo (Framinan; Leisten e Ruiz, 2014), a descrição do conjunto de recursos que podem executar as diferentes operações é um dado crítico que geralmente determina a dificuldade das decisões de agendamento (Framinan, *et al.*, 2019). Considerando as restrições de recursos e de precedência entre tarefas que podem ser classificados em três principais categorias: *Single-machine scheduling* (uma única máquina para processar todas as tarefas), *Parallel-machine scheduling* (várias máquinas paralelas, onde cada tarefa pode ser executada em qualquer máquina) e *Flow shop, Open Shop e Job shop scheduling* (configurações de múltiplas máquinas onde há um fluxo específico de tarefas, chamadas de máquinas dedicadas, comum em fábricas com etapas de processamento sequenciais) (Józefowska, 2007).

Em um *open shop*, a ordem em que as operações são realizadas é arbitrária. Em *flow shop* ordem das operações é fixa para cada tarefa e a j -ésima operação de cada tarefa é realizada na máquina j (Józefowska, 2007). No *job shop*, a ordem das operações também é fixa para cada tarefa e cada trabalho é um conjunto de m atividades completamente ordenadas, onde cada atividade tem uma duração para a qual ele deve ser executado e um recurso no qual deve ser executado Beck *et al.* (2003).

No contexto florestal, a categoria *Single-machine scheduling* pode ser aplicada, por exemplo, para o planejamento de manutenção de equipamentos, onde é necessário agendar as tarefas de manutenção de forma que uma única máquina seja liberada para uso contínuo após uma pausa mínima. *Parallel-machine scheduling* se aplica a situações onde existem múltiplos equipamentos (como tratores, e equipamentos) disponíveis para a mesma tarefa, como o plantio de mudas em diferentes talhões, permitindo que a equipe de planejamento selecione o equipamento disponível para concluir uma tarefa, acelerando o processo de produção e reduzindo tempos ociosos. *Flow shop* foi aplicado por Mäkinen (2019) para otimização de programação de fluxo de trabalho para operações de colagem e revestimento em uma linha de produção de compensados, considerando tempos de *setup* dependentes da sequência e a divisão do modelo em duas partes: uma para a colagem e outra para o revestimento o que reduziu significativamente o tempo de computação, mantendo uma solução próxima do ótimo, sendo mais rápida que a abordagem integral. *Open shop* pode ser aplicado a atividades florestais que não seguem uma sequência rígida, como a coleta de dados de inventário em múltiplas parcelas ou monitoramento ambiental, ele permite mais flexibilidade para realizar as tarefas em qualquer ordem, respeitando apenas as restrições de disponibilidade de recursos.

A modelagem *job shop* foi estudada por Beck *et al.* (2003) no qual apresentaram as diferenças entre problemas de roteamento veicular (VRP) e problemas de *job shop* (JSP) e aplicam técnicas de roteamento e programação de veículos aos VRPs. Em seu estudo, eles

incluem restrições de precedência independentes de veículos ao VRP e observam que as técnicas de roteamento que eles usam têm dificuldades em encontrar soluções viáveis, enquanto as técnicas de programação encontram soluções viáveis para todas as instâncias do problema estudadas. Gélinas e Soumis (2005) usam técnicas de decomposição para resolver problemas de JSP em larga escala.

Um dos problemas mais estudados em otimização combinatória é o Problema do Caixeiro Viajante, que visa encontrar o caminho mais curto possível para percorrer todos os pontos de demanda, partindo de um ponto de oferta e retornando ao ponto de origem, visitando cada ponto de demanda ou oferta apenas uma vez (Hillier e Lieberman, 2006). Esse problema ganha ainda mais complexidade quando se incluem restrições, como a de limitar a demanda da rota à capacidade de carga do veículo (PRVC) ou de variar as rotas em dias diferentes (PRPV). Essas restrições derivam variações conhecidas como Problemas de Roteamento de Veículos (PRV), nas quais cada nova restrição adicionada gera uma variante específica do PRV.

No Problema de Roteamento de Veículo Capacitado (PRVC), a comparação entre distâncias e tempos requer que a rota se inicie e termine no mesmo ponto. Nesse contexto, deve-se considerar frotas idênticas, respeitar a capacidade máxima de carga dos veículos e evitar visitas repetidas aos mesmos locais (Dantzig; Ramser, 1959; Panneerselvam, 2012; Tóth; Vigo, 2002; Yeun *et al.*, 2008). Em situações onde determinados locais demandam visitas periódicas — como no deslocamento de frentes de trabalho, reabastecimento de estoque ou coleta de produtos e resíduos —, encontra-se o Problema de Roteamento Periódico de Veículo (PRPV). Esse problema exige a modelagem de restrições, a definição dos locais a serem atendidos em cada dia e o número de veículos disponíveis (Munhoz *et al.*, 2012; Barros Junior, 2017). Dada a complexidade, esses problemas são classificados como *NP-hard*, devido ao elevado grau de dificuldade de resolução.

Para resolver problemas de roteamento veicular, Laporte (2000) destaca abordagens que variam entre algoritmos exatos e meta-heurísticos. Os algoritmos exatos, como os métodos de busca direta em árvore, programação dinâmica e programação linear inteira, encontram soluções ótimas. Já os algoritmos meta-heurísticos, incluindo busca tabu, *simulated annealing* e algoritmos genéticos, buscam boas soluções viáveis, ainda que não necessariamente ótimas.

Problemas de agendamento com janelas de tempo, por sua vez, têm origem na filosofia *Just-in-Time* (JIT). Modelos de agendamento JIT usualmente consideram datas de vencimento dos trabalhos, penalizando tanto a antecipação quanto o atraso (Kramer e Lee, 1993). Um trabalho concluído antes da data de vencimento incorre em penalidade por antecipação, como custo de manutenção. Em contraste, trabalhos concluídos após o vencimento acarretam custo

de atraso, como taxas de entrega expressa ou perda de vendas (Janiak *et al.*, 2015). Dentro da janela de tempo estipulada, no entanto, o trabalho é considerado no prazo e não sofre penalizações. Caso contrário, a penalidade aplicada dependerá se o trabalho foi concluído antes ou depois da data final (Janiak *et al.*, 2015). Nesses casos é comum usar como função objetivo a minimização do *makespan*, ou seja, a minimização do tempo total necessário para concluir um conjunto de tarefas em um sistema.

Esses problemas de agendamento com datas de vencimento ou janelas de tempo são frequentemente vistos como problemas de otimização bicritério ou multicritério (Janiak *et al.*, 2015). Isso significa que visam minimizar uma função composta linear que considera penalidades de antecipação e atraso e, por vezes, a posição e a dimensão das janelas de vencimento (Hoogeveen, 2005). Alguns problemas buscam minimizar um objetivo específico (por exemplo, a soma das penalidades de antecipação) enquanto observam restrições em outros objetivos, como a soma das penalidades de atraso (Wan e Yen, 2009; Cheng *et al.*, 2014). Como exemplo prático, Hachemi *et al.* (2013) estudaram um problema de escalonamento e transporte diário de toras, resolvido de forma sequencial, com o objetivo de minimizar o custo de caminhões e o tempo de espera improdutivo para carregamento e descarregamento de máquinas. Esse tipo de roteirização é similar a algumas tarefas silviculturais, nas quais se faz necessário o escalonamento ao longo do tempo para otimizar o uso dos recursos.

O Brasil segue na vanguarda da eficiência do manejo silvicultural pelo fato do setor ser concentrado e controlado pelas grandes indústrias florestais, uma vez que as mesmas mantêm investimentos significativos em pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias (Valverde, 2014). Contudo, os desafios para manter essa alta performance são grandes, por fatores extrínsecos como variações de precipitações hídricas e de temperatura, aumento dos preços de insumos, e por fatos intrínsecos, como o grande número de operações que devem ser realizadas de forma sequencial com intervalos de tempo pré-estabelecidos para cada atividade e entre elas e por colaboradores que trabalham em equipes que podem ou não ser específicas de cada operação. Sendo que a não execução ou a operacionalização fora da janela de tempo para determinadas operações, podem acarretar grandes prejuízos em perdas volumétricas para o plantio. Dessa forma, o sequenciamento ideal das operações silviculturais se apresenta como um problema de grande complexidade, pois além do grande número de atividades, normalmente elas devem ser planejadas para um grande número de unidades de produção (talhões).

Mendonça (2016) exemplifica de forma muito didática a grande dificuldade do planejamento da silvicultura, dando o exemplo de uma única atividade que deve ser planejada para cinco talhões durante um período de cinco dias e dois modos de execução. As combinações

de todos contra todos somam 50 conjuntos. Agora se considerarmos um cenário real de cerca de 15 operações somente no primeiro ano de idade da floresta, três formas de manejo diferentes, janelas de tempo específicas para cada uma das operações, atividades com equipes especializadas, teremos um número de combinações extremamente alto.

2.5 Considerações finais

Embora o Brasil seja um destaque mundial no cultivo de eucalipto, ainda há necessidade de aprofundamento nos estudos que aplicam técnicas de pesquisa operacional ao planejamento das atividades de silvicultura. Alto valor dos insumos e escassez de mão de obra tornam o custo de implantação florestal alto, sendo assim, para manter a competitividade do negócio sem perda de produtividade das florestas, a elaboração de planos operacionais baseadas em modelos matemáticos robustos é uma excelente alternativa comparado as práticas empíricas atualmente utilizadas pela maior parte dos silvicultores.

REFERÊNCIAS

- AKAY, A. E. et al. **Using optimization techniques in designing forest roads and road networks.** *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, [S.l.], v. 15, n. 1, p. 49–62, 2013.
- ALLAHVERDI, A.; NG, C.T.; CHENG, T.C.E.; KOVALYOV, MIKHAIL Y. **A survey of scheduling problems with setup times or costs.** *European Journal of Operational Research*, v. 187, n. 3, p. 985-1032, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.060>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- ALONSO-AYUSO, A.; ESCUDERO, L. F.; GUIGNARD, M.; QUINTEROS, M.; WEINTRAUB, A. **Forestry management under uncertainty.** *Annals of Operations Research*, v. 190, p. 17-39, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0561-0>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- ARENALES, M. ARMETANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia.** Elsevier Brasil, 2015.
- BALAS, E. **Programação matemática em gestão florestal.** In: Terceira Sessão Científica sobre Estatística, 1963, Bucareste. Anais da Terceira Sessão Científica sobre Estatística, 5 a 7 de dezembro de 1963. Bucareste, Romênia.
- BALAS, E. **Um algoritmo aditivo para resolver programas lineares com variáveis 0–1.** *Pesquisa Operacional*, v. 13, n. 4, p. 517-546, 1965.
- BANHARA, J. R. **Agendamento otimizado das atividades de colheita de madeira em plantios de eucalipto sob restrições operacionais, espaciais e de risco climático.** 2009. 166 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.
- BARBOSA, L. H. S.; GOMES, C. F. S.; CHAVES, M. C. C. **Scheduling of agents in inbound multilingual call centers.** *Brazilian Journal of Operations and Production Management*, v. 14, p. 228-237, 2017.
- BARROS J., A. A. **Aplicações de heurísticas em problemas de planejamento florestal multiobjetivo.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 2010.
- BARROS J., ALMEIDA A. de. **Modelagem do Problema de Roteamento no Planejamento do Inventário Florestal.** 2017. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro – ES, 2017.
- BASKENT, E. Z.; BORGES, J. G.; KAŠPAR, J. **An updated review of spatial forest planning: approaches, techniques, challenges, and future directions.** *Current Forestry Reports*, v. 10, p. 299-321, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00222-8>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- BATEMAN, T. S.; SNELL, Scott A. **Administração: construindo vantagem competitiva.** 1º ed. São Paulo: Atlas, 1998.

BRASIL. Lei nº 5.106, de 2 de setembro de 1966. **Dispõe sobre os incentivos fiscais concedidos a empreendimentos florestais.** Brasília, DF: Presidência da República, 1966. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/1950-1969/L5106.htm. Acesso em: 24 set. 2024.

BECK, J. C.; PROSSER, P.; SELENSKY, E. **Vehicle Routing and Job Shop Scheduling: What's the Difference?** ICAPS-03 Proceedings. Cork Constraint Computation Center, University College Cork, Ireland; Department of Computing Science, University of Glasgow, Scotland, 2003. Disponível em: www.aaai.org. Acesso em: 11 nov. 2024.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 541 p.

BELAVENUTTI, P.; ROMERO, C.; DIAZ-BALTEIRO, L. **A critical survey of optimization methods in industrial forest plantations management.** Scientia Agricola, Piracicaba, v. 75, n. 3, p. 239–245, 2018.

BELAVENUTTI, P.; ROMERO, C.; DIAZ-BALTEIRO, L. **Integrating strategic and tactical forest-management models within a multicriteria context.** Forest Science, v. 65, n. 2, p. 178-188, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxy052>. Acesso em: 3 out. 2024.

BERTAGNON, A. **Improving Reasoning in Constraint Logic Programming: An Application to Route Planning and Qualitative Temporal Reasoning Problems.** 2021. Tese de Doutorado – Università di Ferrara, Itália, 2021. Acesso em: 21 oct 2024.

BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest Management and Planning.** Academic Press, 2009, 342 p.

BETTINGER, P.; DEMIRCI, M.; BOSTON, K. **Search reversion within smetaheuristics: impacts illustrated with a forest planning problem.** Silva Fennica, v.49, n.2, p.1-20, 2015.

BINOTI, D. H. B. **Estratégias de regulação de florestas equiâneas.** 2010. 159f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa –MG, 2010.

BIRGE, J. R.; LOUVEAUX, F. **Introduction to Stochastic Programming.** New York: Springer, 2011.

BLUM, c.; Roli A.; Alba E. **Na introduction to metaheuristic techniques.** In: ALBA, E. Parallel metaheuristics: a new class of Algorithms. New York: John Wiley & Sons, 2005. Chap. 1 p.1-42.

BORGES, J.G. et al. **Strategic management scheduling.** In: The management of industrial forest plantations. Springer, 2014.

BOYLAND, M.; NELSON, J.; BUNNELL, F. L. **Creating land allocation zones for forest management: a simulated annealing approach.** Canadian Journal of Forest Research, v. 34, n. 8, p. 1669-1682, 2004.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, J.K. **Decision methods for Forest resource management.** San Diego: Academic Press, 2003. 439 p.

CARIOU C, MOIROUX-ARVIS L, PINET F, CHANET J P. **Evolutionary Algorithm with Geometrical Heuristics for Solving the Close Enough Traveling Salesman Problem: Application to the Trajectory Planning of an Unmanned Aerial Vehicle.** *Algoritmos.* 2023; 16(1):44. <https://doi.org/10.3390/a16010044>

CHENG, M.; TADIKAMALLA, P.; SHANG, J.; ZHANG, S. **Bicriteria hierarchical optimization of two-machine flow shop scheduling problem with time-dependent deteriorating jobs.** *European Journal of Operational Research*, v. 234, p. 650-657, 2014.

CHOUDHRY, H.; O'KELLY, G. **Precision forestry: a revolution in the woods.** McKinsey & Company, jun. 2018. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/paper-forest-products-and-packaging/our-insights/precision-forestry-a-revolution-in-the-woods>. Acesso em: 25 set. 2024.

CORDEAU, J. –F. et al. **A guide to vehicle routing heuristics.** *Journal of the Operational Research Society*. v. 53, n. 5, p. 512–522, 2002.

CRUZ, B. R. **Regulação silvicultural das atividades operacionais na programação de projetos florestais via Simulated Annealing.** 2015. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2015.

CYR G, RAULIER F, FORTIN D, POTHIER D. **Using operating area size and adjacency constraints to mitigate the effects of harvesting activities on boreal caribou habitat.** *Landscape Ecol.* 2017;32(2):377–95. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0455-x> .

DANTZIG, G. B; RAMSER, J. H. **The truck dispatching problem.** *Management Science*, New York, v.6, n.1, pp. 80-91, 1959.

D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. **Using operational research for supply chain planning in the forest products industry.** *INFOR: Information Systems and Operational Research*, v. 48, n. 1, p. 43-64, 2010.

EL HACHEMI, N.; GENDREAU, M.; ROUSSEAU, L.-M. **A heuristic to solve the synchronized log-truck scheduling problem.** *Computers & Operations Research*, v. 40, p. 666-673, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.02.002>.

EXLER, R. B.; BANDEIRA, F. R. M. **A utilização da pesquisa operacional como ferramenta assistente ao processo da tomada de decisão gerencial.** *ReAC – Revista de Administração e Contabilidade, Faculdade Anísio Teixeira (FAT), Feira de Santana*, v. 2, n. 2, p. 59-69, jul./dez. 2010.

EZQUERRO, M.; PARDOS, M.; DIAZ-BALTEIRO, L. **The inclusion of improved forest management in strategic forest planning and its impact on timber harvests, carbon and biodiversity conservation.** *Science of the Total Environment*, v. 949, p. 174813, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724049623>. Acesso em: 3 out. 2024.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings**. Roma: FAO, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/ca8753en>. Acesso em: 24 set. 2024.

FAO. Global forest sector outlook 2050: **Assessing future demand and sources of timber for a sustainable economy – Background paper for The State of the World's Forests 2022**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc2265en>. Acesso em: 12 nov. 2024.

FERREIRA, M. A.; SILVA, C. S. J. e; GOMIDE, L. R.; CONTRERAS, M. A.; LOPES, E. T.; RODRIGUES, R. C.; MELLO, J. M.; MENDONÇA, N. P. **Otimização do suprimento de madeira na indústria de celulose brasileira envolvendo fomentos florestais**. Revista *Árvore*, v. 43, n. 5, e430504, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882019000500004>. Acesso em: 08 out. 2024.

FOTAKIS D G, SIDIROPOULOS E, MYRONIDIS D, IOANNOU K. **Algoritmo genético espacial para planejamento florestal multiobjetivo**. *Para Policy Econ.* 2012; 21:12 –9. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.04.002> .

FRAMINAN, J. M.; PÉREZ-GONZÁLEZ, P.; FERNÁNDEZ-VIAGAS, V. **Deterministic assembly scheduling problems: A review and classification of concurrent-type scheduling models and solution procedures**. *European Journal of Operational Research*, v. 273, n. 2, p. 401-417, 2019.

FRAMINAN, J.; LEISTEN, R.; RUIZ, R. **Manufacturing scheduling systems: An integrated view of models, methods, and tools**. Springer, 2014.

GADOW, K. V., PUKKALA, T. (2008). **Designing Green Landscapes**. Vol. 15 of the Book Series "Managing Forest Ecosystems", Springer Verlag, Dordrecht: 301 p. (ISBN: 978-1-4020-6758-7).

GÉLINAS, S.; SOUMIS, F., Dantzig. **Wolfe decomposition for job shop scheduling**. In: DESAULNIERS, Guy; DESROSIERS, Jacques; SOLOMON, Marius M. (Org.). *Column Generation*. Springer, 2005. p. 271-302.

GOGNA, A.; TAYAL, A. **Metaheuristics: Review and application**. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, United Kingdom, v. 25, n. 4, p. 503–526, 1 dez. 2013.

GOLDBARG, E.; GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Meta-heurísticas: Algoritmos e Aplicações**, Rio de Janeiro: Campus, 2015. 416 p.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2005. 518 p.

GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial**. 2009. 256f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2009.

GONÇALVES, J. L. M., et al. **Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations**. *Forest Ecology and*

Management, v. 301, p. 6-27, 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>.

GRATTAPAGLIA, D. **Twelve years into genomic selection in forest trees: climbing the slope of enlightenment of marker assisted tree breeding.** Forests, v. 13, p. 1554, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f13101554>.

HERTZ, A.; WIDMER, M. **Guidelines for the use of meta-heuristics in combinatorial optimization.** European Journal of Operational Research, Netherlands, v. 151, n. 2, p. 247–252, 2003.

HILLER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to operational research.** 8 th ed. New York: McGraw-Hill, 2005. 1061 p.

HIRSCH, P.; GRONALT, M. **The timber transport order smoothing problem as part of the three-stage planning approach for round timber transport.** Journal of Applied Operational Research, v. 5, p. 70-81, 2013.

HOOGEVEEN, H. **Multicriteria scheduling.** European Journal of Operational Research, v. 167, p. 592-623, 2005.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2023.** São Paulo: Ibá, 2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 24 set. 2024.

JANIAK, A.; JANIAK, W. A.; KRYSIAK, T.; KWIATKOWSKI, T. **A survey on scheduling problems with due windows.** European Journal of Operational Research, v. 242, p. 347-357, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 11 nov. 2024.

JÓZEFOWSKA, J. **Just-in-Time Scheduling: Models and Algorithms for Computer and Manufacturing Systems.** Nova York: Springer Science + Business Media, 2007. (International Series in Operations Research & Management Science).

KOGLER, C. **Decision support by discrete event simulation for the wood supply chain.** 2020. Dissertação (Mestrado) – University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna. Disponível em: <https://permalink.obvsg.at/bok/AC16139733>.

KOGLER, C.; RAUCH, P. **Discrete event simulation of multimodal and unimodal transportation in the wood supply chain: A literature review.** Silva Fennica, v. 52, n. 4, p. 1-29, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.14214/sf.9984>.

KOGLER, C.; RAUCH, P. **Lead time and quality driven transport strategies for the wood supply chain.** Research in Transportation Business & Management, v. 47, p. 100946, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.100946>. Acesso em: 02 out. 2024.

KOGLER, C.; SCHIMPFHUBER, S.; EICHBERGER, C.; RAUCH, P. **Benchmarking procurement cost saving strategies for wood supply chains.** Forests, v. 12, n. 8, p. 1-18, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f12081086>.

KRAMER, F.-J.; LEE, C.-Y. **Commodue – window scheduling**. *Production and Operations Management*, v. 2, n. 4, p. 262-275, 1993.

LAFETÁ, B. O. **Eficiência nutricional, área foliar e produtividade de plantações de eucalipto em diferentes espaçamentos estimados com redes neurais artificiais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri; Diamantina - MG, 2012.

LAPORTE, G. et al. **Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem**. *International Transactions in Operational Research*, v. 7, n 4-5, p. 285-300, 2000.

LEÃO, R. M. **A floresta e o homem**. São Paulo: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000. 448 p.

LENSTRA, J.; RINNOOY KAN, A. **Complexity of vehicle routing and scheduling problems**. *Networks*, v. 11, p. 221-227, 1981.

LONGUE J., D.; COLODETTE, J. L. **Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal**. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 33, n. 76, p. 429–438, 2013. DOI: 10.4336/2013.pfb.33.76.528. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/528>. Acesso em: 5 jul. 2023.

MÄKINEN, S. **Flow shop scheduling of multi-phase plywood production with parallel machines**. 2019. 51 f. Master's Thesis (Master of Science in Technology) — School of Science, Aalto University, Espoo, 2019.

MAXIMO, Y. I.; HASSEGAWA, M.; VERKERK, P. J.; MISSIO, A. L. **Forest Bioeconomy in Brazil: Potential Innovative Products from the Forest Sector**. *Land*, v. 11, n. 1297, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land11081297>. Acesso em: 12 nov. 2024.

MENDONÇA, N. P. **Aplicação do método Simulated Annealing em um problema de sequenciamento das atividades silviculturais**. 2016. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2016.

MENDONÇA, N. P., LOPES, I. L., GOMES, V. S., FERREIRA, M. A., CRUZ, B. R., SILVA, C. S. J., GOMIDE, L. R. **Silvicultural tasks Scheduling Optimization: A Case Study of Functions and Methods**, *Revista Árvore* v. 46, p 2022.

MENON, M. U. **Meta-heurística na otimização do sortimento florestal**. 2005. 119p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2005.

MITCHELL, G. **Problems and fundamentals of sustainable development indicators**. *Sustainable Development*, v. 4, n. 1, p. 1, 1996. ISSN 0968-0802.

MUNHOZ, P. L. A. **Um algoritmo baseado em iterated local search para o problema de roteamento de veículos periódico**. 2012, 50 f. Dissertação (Mestrado em Computação) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2012.

MUYS, B. et al. **Simulation tools for decision support to adaptive forest management in Europe**. *Forest Systems, Spain*, v. 19, p. 86–99, 2010.

NOUJDINA, N. V.; USTIN, S. L. **Mapping downy brome (*Bromus tectorum*) using multirate AVIRIS data.** *Weed Science*, v. 56, p. 173-179, 2008.

OLIVEIRA, R. M. **Desenvolvimento de um sistema de otimização florestal para o planejamento e controle do transporte de madeira (FLoS).** 2021 57p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2021.

PALMGREN, M., RÖNNQVIST, M., VÄRBRAND, P. **A near-exact method for solving the log-truck scheduling problem.** *International Transactions in Operational Research* 2004

PALMGREN, M.; RÖNNQVIST, M.; VÄRBRAND, P. **A solution approach for log truck scheduling based on composite pricing and branch and bound.** *International Transactions in Operational Research*, v. 10, p. 433-447, 27 ago. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1475-3995.00420>. Acesso em: 12 nov. 2024.

PANNEERSELVAM, R. **Production and Operations Management.** 3. ed. New Delhi: PHI Learning, 2012.

PAULL, A. E. **Linear programming: a key to optimal newsprint production.** *Pulp and Paper Magazine of Canada*, v. 57, p. 145-150, 1956.

PAYN, T.; CARNUS, J.-M.; FREER-SMITH, P.; KIMBERLY, M.; KOLLERT, W.; LIU, S.; ORAZIO, C.; RODRIGUEZ, L.; SLIVA, L. N.; WINGFIELD, M. J. **Changes in planted forests and future global implications.** *Forest Ecology and Management*, v. 352, p. 57-67, 2015.

REBELLO, F. R.; HUMACHER, S. **Uma proposta de algoritmo genético de duas fases para roteamento de veículos.** In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 32., 2000, Viçosa. Anais... Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p. 672-688.

RIJAL, B.; LEBEL, L.; GAUTAM, S. H.; CANTEGRIL, P. **A Sequential Optimization Approach in Tactical Planning for Value Creation in the Forest Products Industry.** *Sustainability*, v. 12, n. 12, p. 4932, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12124932>. Acesso em: 08 out. 2024.

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais.** 2001. 225f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2001.

RODRIGUES, F. L.; SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. E. M. **Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento.** *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 30, n. 5, p. 769-778, 2006. Disponível em: <https://www.sif.org.br/textexto>. Acesso em: 8 out. 2024.

RODRIGUEZ, L. C. E. **Planejamento agropecuário através de um modelo de programação linear não determinista.** 1987. 83p. Dissertação (Mestrado em Economia Agrária) - Escola Superior Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 1987.

RÖNNQVIST, M.; D'AMOURS, S.; WEINTRAUB, A.; JOFRE, A.; GUNN, E.; HAIGHT, R. G.; MARTELL, D.; MURRAY, A. T.; ROMERO, C. **Operations research challenges in forestry: 33 open problems.** *Annals of Operations Research*, v. 232, p. 11-40, 2015.

RÖNNQVIST, M.; MARTELL, D.; WEINTRAUB, A. **Fifty years of operational research in forestry.** *International Transactions in Operational Research*, v. 30, p. 3296-3328, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/itor.13316>.

ROSE, D.W. **Data, models and technology in forest planning.** *Revista Florestal*, Lisboa, 12(1), p35-44, 1999.

ROSSI, F.; VAN BEEK, P.; WALSH, T. **Handbook of constraint programming.** Netherlands: Elsevier, 2006.

SANKEY T; DONAGER J.; SU, MCVAY J.; SANKEY J. **UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA.** *Remote Sensing of Environment*, v. 195, p. 30-45, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425717301578>. Acesso em: 25 set. 2024.

SANKEY, T.; GLENN, N. **Landsat-5 TM and lidar fusion for sub-pixel juniper tree cover estimates in a western rangeland.** *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 77, n. 12, p. 1241-1248, 2011.

SANTOS, A. C. A. **Modelagem matemática para planejamento operacional integrado das atividades de colheita, baldeio e transporte.** 2019. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2019.

SEGURA, M.; RAY, D.; MAROTO, C. **Decision support systems for forest management: A comparative analysis and assessment.** *Computers and Electronics in Agriculture*, England, v. 101, p. 55-67, 2014.

SERRANO-RAMÍREZ, E.; VALDEZ-LAZALDE, J. R.; SANTOS-POSADAS, H. M. I.; MORA-GUTIÉRREZ, R. A.; ÁNGELES-PÉREZ, G. **A forest management optimization model based on functional zoning: A comparative analysis of six heuristic techniques.** *Ecological Informatics*, v. 61, p. 101234, 2021. ISSN 1574-9541. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101234>.

SESSIONS, J.; BETTINGER, P. **Hierarchical planning: pathway to the future?** In: INTERNATIONAL PRECISION FORESTRY COOPERATIVE SYMPOSIUM, 1st, 2001, Seattle. Proceedings. Seattle: USDA Forest Service, 2001. p. 185-190.

SESSIONS, J.; BETTINGER, P.; MURPHY, G. **Heuristics in forest planning.** In: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJØRNDAL, T.; EPSTEIN, R. (Org.). *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. New York: Springer, 2007. p. 432-448.

SHAMSHIRI, R.R. **Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture,** *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 11, no. 1, 2018

SHAMSHIRI, R. R.; HAMEED, I. A.; THORP, K. R.; BALASUNDRAM, S. K.; SHAFIAN, S.; FATEMIEH, M.; SULTAN, M.; MAHNS, B.; SAMIEI, S. **Greenhouse automation using wireless sensors and IoT instruments integrated with artificial intelligence.**

IntechOpen, 2021. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/76695#>. Acesso em: 25 set. 2024.

SOARES, N., SILVA, M. L.; CORDEIRO, S. A. **Produto interno bruto do setor florestal brasileiro**, 1994 a 2008. Revista *Árvore*, Viçosa-MG, v. 38, n. 4, p. 725-732, 2014. Acesso em: 24 set. 2024.

SOARES R. **Improving efficiencies in silviculture operations through real-time analytics. For SilviTech, 2023.** Disponível em: <https://www.forsilvitech.com/article/improving-efficiencies-in-silviculture-operations-through-real-time-analytics/>. Acesso em: 25 set. 2024.

SOUZA, A.B.D.; MOCCELLIN, J.V. **Metaheurística híbrida algoritmo genético-busca tabu para programação de operações flow shop.** In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 32, 2000, Viçosa. Anais. Viçosa: UFV, 2000. p.314-324.

ST. LOUIS FED. **How the Russia-Ukraine War Fueled Record Fertilizer Prices, 2022.** Disponível em: <https://www.stlouisfed.org>.

TOTH, P.; VIGO, D. **Metaheuristics for the VRP.** In: TOOTH, P.; VIGO, D. (Ed.). *The vehicle routing problem*. Philadelphia: SIAM, 2002, p. 129-154.

TSOUROS, D. C.; BIBI, S.; SARIGIANNIDIS, P. G. **A review on UAV-based applications for precision agriculture.** *Information*, v. 10, n. 349, p. 1-26, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337187714_A_Review_on_UAV-Based_Applications_for_Precision_Agriculture. Acesso em: 25 set. 2024.

TURBAN, E; ARONSON, J.E. **Decision support systems and intelligent systems.** New Jersey: Prentice-Hall, 1998. 890p.

VALVERDE, S. R. et al. **Silvicultura brasileira: desafios e oportunidades para a economia verde.** Rio de Janeiro: Fundo Brasileiro de Desenvolvimento Sustentável, 2014. 40 p.

VELIZ, F.; WATSON, J.-P.; WEINTRAUB, A.; WETS, R.; WOODRUFF, D. **Stochastic optimization models in forest planning: a progressive hedging solution approach.** *Annals of Operations Research*, v. 232, n. 1, p. 259-274, set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1608-4>. Acesso em: 12 nov. 2024.

VIEIRA, H. P. **Metheurística para a solução de problemas de roteamento de veículos com janela de tempo.** Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica - UNICAMP, Campinas - SP, 2013.

ZENG H, PUKKALA T, PELTOLA H, KELLOMÄKI S. **Aplicação da otimização de colônias de formigas para o gerenciamento de risco de danos causados pelo vento no planejamento florestal.** *Silva Fennica*. 2007;41(2):Artigo ID 299.<https://doi.org/10.14214/sf.299> .

WAN, G.; YEN, B. P.-C. **Single machine scheduling to minimize total weighted earliness subject to minimal number of tardy jobs.** European Journal of Operational Research, v. 195, p. 89-97, 2009.

WORLD ECONOMIC FORUM. **War-induced fertilizer crunch threatens global food security, 2023.** Disponível em: <https://www.weforum.org>.

WEINTRAUB, A.; EPSTEIN, R.; MORALES, R.; SERON, J.; TRAVERSO, P. **A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries.** Interfaces, v. 26, n. 4, p. 1-12, 1996.

YEUN, W.R. ISMAIL, K. OMAR, and M. ZIROUR. **Vehicle routing problem: models and solutions.** Journal of Quality Measurement and Analysis, 4(1):205– 218, 2008.

SEGUNDA PARTE

**UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA CONSTRUTIVA PARA AGENDAR E
SEQUENCIAR ATIVIDADES SILVICULTURAIS EM JANELAS DE TEMPO
RESTRITAS**

RESUMO

O Brasil desempenha papel crucial na expansão do setor florestal na América do Sul, com crescimento de 52,9% em 14 anos. Entretanto, desafios como variações climáticas, aumento nos custos de insumos e a complexidade das operações sequenciais representam grandes obstáculos. A não execução ou operacionalização fora das janelas temporais pode ocasionar prejuízos volumétricos significativos, tornando o sequenciamento das operações silviculturais uma questão de alta complexidade. Métodos heurísticos surgem como alternativa viável para lidar com a elevada quantidade de variáveis e restrições envolvidas nesses problemas. Neste contexto, esta pesquisa propôs um modelo determinístico de otimização para o microplanejamento operacional de talhões, com base em uma heurística construtiva, que respeita janelas de tempo e minimiza deslocamentos e ociosidades das equipes. O simulador SIOP, desenvolvido para generalizar o problema, reproduz o status inicial dos talhões e traça rotas otimizadas, enquanto o modelo CHESS-W realiza o agendamento de 16 principais atividades silviculturais no primeiro ano pós-colheita. Os resultados mostram que o SIOP gerou instâncias realistas e generalizadas, abrangendo 966 talhões e 28.635,35 hectares. O CHESS-W, aplicado a 80 fazendas, agendou cerca de 1.531,1 horas úteis/fazenda, sequenciando 74,8% (1.145,8 horas úteis/fazenda) de forma contínua, com eficiência crescente conforme o número de talhões. Apesar de desafios como 4,9% de ociosidade, o modelo garantiu a aderência técnica às janelas temporais. Em comparação ao cenário real, a eficiência foi 23,5% inferior, mas assegurou conformidade técnica, apresentando-se como ferramenta viável para o microplanejamento florestal.

Palavras-chave: Planejamento silvicultural, heurística construtiva, janela de tempo, agendamento, sequenciamento.

ABSTRACT

Brazil plays a crucial role in the expansion of the forestry sector in South America, with a 52.9% growth over 14 years. However, challenges such as climate variations, rising input costs, and the complexity of sequential operations represent significant obstacles. Failure to perform operations or conducting them outside the optimal time windows can lead to considerable volumetric losses, making the sequencing of silvicultural operations a highly complex issue. Heuristic methods emerge as a viable alternative to handle the large number of variables and constraints involved in these problems. In this context, this research proposed a deterministic optimization model for the operational microplanning of stands, based on a constructive heuristic, which respects time windows and minimizes team displacements and idle times. The SIOP simulator, developed to generalize the problem, reproduces the initial status of the stands and outlines optimized routes, while the CHESS-W model schedules 16 major silvicultural activities during the first post-harvest year. The results show that SIOP generated realistic and generalized instances, covering 966 stands and 28,635.35 hectares. CHESS-W, applied to 80 farms, scheduled approximately 1,531.1 working hours per farm, sequencing 74.8% (1,145.8 working hours per farm) continuously, with increasing efficiency as the number of stands grew. Despite challenges such as 4.9% idleness, the model ensured technical compliance with time windows. Compared to the actual scenario, efficiency was 23.5% lower but maintained technical adherence, presenting itself as a viable tool for forest microplanning.

Keywords: Silvicultural planning, constructive heuristic, time window, scheduling, sequencing.

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2023), a área de florestas plantadas no país cresceu 52,9% entre 2008 e 2022, saltando de 6,5 milhões para 9,9 milhões de hectares. Essa expansão é reflexo da crescente demanda por produtos de base florestal, cujo consumo global deverá aumentar 37% até 2050, atingindo cerca de 3,1 bilhões de m³, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (FAO, 2022). O Brasil tem um papel crucial nesse cenário, consolidando-se como um dos principais produtores de madeira cultivada, com avanços tecnológicos que impulsionaram o crescimento do setor. Contudo, o setor florestal enfrenta desafios operacionais significativos que ameaçam sua competitividade e sustentabilidade. Entre esses desafios estão o aumento expressivo dos custos – fenômeno conhecido como inflação florestal – e a escassez de mão de obra qualificada para o trabalho no campo. Segundo a AFRY (2023), o custo da atividade florestal tem crescido acima da inflação oficial, pressionado principalmente por combustíveis, logística e mão de obra. Soma-se a isso o fato de que os principais polos de expansão da silvicultura, especialmente no Centro-Oeste brasileiro, coincidem com regiões marcadas por baixos índices populacionais e grandes vazios demográficos, o que dificulta a alocação de equipes operacionais (Vieira; IOB, 2009). A escassez de trabalhadores no campo é agravada por uma tendência histórica de êxodo rural e envelhecimento da população agrícola, que reduz a disponibilidade de mão de obra e encarece a execução de operações (Garcia *et al.*, 2018). Tais fatores impõem ao planejamento operacional da silvicultura uma necessidade urgente de inovação, buscando maior eficiência no uso dos recursos disponíveis.

A silvicultura, entendida como o conjunto de práticas voltadas ao cultivo, manejo e regeneração de florestas, é fundamentada no conhecimento das características ecológicas do sítio e visa atingir condições sustentáveis de produção florestal ao longo do tempo (Louman *et al.*, 2001). Esse campo técnico-científico busca não apenas garantir o suprimento contínuo de matéria-prima, mas também equilibrar os aspectos econômicos, sociais e ambientais do uso da terra. É composta por um grande número de operações interdependentes que devem ser executadas em janelas de tempo específicas, exigindo a atuação coordenada de múltiplas equipes e recursos. Em linhas gerais, as etapas principais da formação de florestas plantadas consideram atividades de limpeza de área (químicas e/ou mecânicas), controle de formigas cortadeiras, preparo de solo com adubação, plantio das mudas, irrigações, manejo de herbicidas nas linhas e entrelinhas, adubações de cobertura e conservação de solos. A complexidade dessa gestão é ampliada pelo fato de que essas operações devem ser realizadas em diversas unidades

produtivas (talhões), que variam em localização, área, condições edafoclimáticas e acessibilidade. A não realização de uma operação ou sua execução fora do período ideal pode comprometer o crescimento florestal e causar perdas volumétricas significativas.

Nesse contexto, o sequenciamento adequado das atividades silviculturais pode ser tratado como um problema de agendamento (*scheduling problem*), tema amplamente estudado na Pesquisa Operacional. O objetivo do *scheduling problem* é alocar eficientemente um conjunto de tarefas a recursos limitados ao longo do tempo, respeitando restrições e otimizando critérios específicos (Józefowska, 2007; Framinan; Leisten; Ruiz, 2014). Esse problema é ainda mais desafiador quando há janelas de tempo rígidas para a execução de atividades, conforme observado em modelos *Just-in-Time*, que penalizam tanto atrasos quanto antecipações (Janiak *et al.*, 2015; Kramer; Lee, 1993).

Diante da escassez de modelos específicos para o planejamento operacional florestal, especialmente na silvicultura tropical, este trabalho propõe um modelo determinístico de microplanejamento baseado em heurística construtiva, com horizonte de planejamento anual e periodicidade diária. O modelo visa agendar e sequenciar as atividades do primeiro ano de manejo pós colheita (reforma) florestal em múltiplos talhões, respeitando janelas de tempo e minimizando tanto o deslocamento das equipes operacionais quanto a ociosidade dos recursos. Assim, o objetivo geral do trabalho foi o desenvolvimento de uma heurística capaz de resolver o problema de agendamento/sequenciamento otimizado das atividades silviculturais, respeitando o cumprimento das janelas de tempo e as dependências temporais entre as atividades. Devido a necessidade de validação da capacidade heurística na resolução do problema base, um simulador de instâncias foi desenvolvido para gerar inúmeras instâncias ou cenários florestais. Os novos problemas formados constituíram uma base rica e diversa, o que objetivou uma múltipla interpretação de sua performance em vários níveis. A natureza do problema é formada por regras rígidas, o que pode resultar em perdas de eficiência pelo método de resolução, e por isso foi avaliado a identificação de atividades sensíveis ao problema, e qual a melhor abordagem para reduzir/eliminar as ociosidades de equipes em múltiplos cenários operacionais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição do problema silvicultural

O planejamento das atividades silviculturais é caracterizado por uma complexidade intrínseca, derivada não apenas do grande número de operações interdependentes envolvidas, mas também da necessidade de cumprir uma sequência lógica e tecnicamente definida para cada operação, considerando as interações entre etapas. Esse planejamento requer o agendamento rigoroso das atividades dentro de janelas de tempo rígidas, além de visar também a minimização do deslocamento das equipes entre os talhões.

O problema de otimização em questão considerou as regras de negócio silviculturais de uma empresa produtora de celulose brasileira. Isso significa que o problema reflete a visão real de um planejador. Nesse sentido, um total de 16 operações silviculturais adotadas foram devidamente selecionadas para compor o problema, sendo elas vinculadas ao primeiro ano de manejo pós colheita. Essas operações possuem equipes especialistas e independentes para cada atividade e seguem uma sequência obrigatória, sem sobreposições dentro de um mesmo talhão, respeitando sempre o intervalo de ocorrência. Este intervalo foi denominado como Janela de Tempo (JT) e descreve um período de tempo em que uma operação pode ser agendada com início e fim bem definidos, ou seja, sua ocorrência.

No problema em questão as JT's são discriminadas por operação e são diretamente dependentes da atividade principal – plantio. De forma integrada, cada operação tem sua JT que deve acontecer durante um determinado intervalo de tempo com relação ao plantio. Como por exemplo a atividade de subsolagem que deve acontecer entre 1 a 20 dias antes do plantio. As JT's são restrições invioláveis, ou seja, elas serão sempre respeitadas, mesmo que isso acarrete ganho em ociosidade ou perda de eficiência do sequenciamento dos talhões. Por exemplo, ao agendar cinco talhões para a atividade de subsolagem, todos deverão obedecer a JT de 1 a 20 dias antes do plantio, mesmo que esses talhões tenham entrado no plano em diferentes status, ou seja, tenham diferentes ODS. A Tabela 1 detalha as operações, suas dependências e a ocorrência temporal da janela de tempo (Início e Fim), tipo de mão de obra utilizada em cada operação, número de colaboradores considerados e o rendimento de cada atividade. Os valores com o campo de sinal negativos indicam que as operações devem ser realizadas antes do plantio, valores iguais a zero são referentes à atividade de plantio e valores positivos, são referentes às operações realizadas após o plantio.

Tabela 1 – Lista de atividades silviculturais base que compõem o problema de otimização florestal.

At	Descrição	Mdo	Rd (h/ha)	GR (%)	N	Sinal	Início	Fim
1	1º Combate de formiga manual	A	0,41	1	4	-	60	30
2	Manutenção de mini-curva	T	0,44	0,3	1	-	45	10
3	Aplicação mecanizada de herbicida pós-emergente em área total	T	0,50	0,7	1	-	30	10
4	Subsolagem com adubação	T	0,87	1	1	-	20	1
5	Plantio semi-mecanizado	A	0,75	1	9		0	0
6	1 Irrigação	T	1,03	1	1	+	1	5
7	2 Irrigação	T	1,24	0,8	1	+	5	10
8	Aplicação mecanizada de herbicida pré-emergente na linha	T	0,44	1	1	+	10	15
9	Replântio	A	3,00	0,25	1	+	20	30
10	Capina mecanizada na linha pré-emergente	T	0,72	1	1	+	35	60
11	Roçada mecânica	T	0,64	0,3	1	+	45	60
12	1ª Aplicação mecanizada de herbicida pós-emergente na entrelinha	T	0,43	1	2	+	45	90
13	2º Combate de formiga manual	A	0,80	0,5	2	+	60	70
14	Aplicação mecanizada de calcário	T	0,40	1	1	+	120	180
15	2ª Aplicação mecanizada de herbicida pós-emergente na entrelinha	T	0,85	0,7	1	+	150	200
16	1ª Adubação mecanizada de cobertura	T	0,45	1	1	+	180	210

At. - atividade silvicultural agendada; Mdo - mão de obra demandada pela atividade, A - ajudante florestal, T - tratorista, Rd – rendimento operacional da atividade, N - número de pessoas na atividade. Fonte: do Autor (2025).

A descrição simplificada de cada atividade e suas respectivas siglas são: *1 e 14) Combate de formiga manual (1 e 2 CF)*: visa realizar o controle do nível crítico de infestação de formigas realizando a aplicação direta de iscas granuladas, formuladas com atrativos alimentares misturados a inseticidas, próximas aos olheiros dos formigueiros; *2) Manutenção de Mini Curva (MMC)*: são utilizadas como técnicas de conservação de solo, para reduzir o acúmulo de águas nas estradas vicinais e minimizar o risco de erosão. A mini-curva é constituída por um camalhão posicionado na estrada, perpendicularmente a esta, com uma ou duas saídas de água que se estendem para dentro do talhão. No manejo de reforma é realizado a manutenção das mini-curvas construídas na implantação da floresta realizando o

desassoreamento das mesmas; 3) *Aplicação Mecanizada de Herbicida Pós-Emergente em Área Total (HPEAT)*: é realizado a aplicação de herbicidas pós-emergente para controle das plantas daninhas e rebrotas do eucalipto com o uso do implemento de barra para maior abrangência da aplicação; 4) *Subsolagem com Adubação (SA)*: é uma atividade de preparo de solo que visa romper as camadas do solo e uniformiza-lo fisicamente, bem como a aplicar fertilizante em profundidade; 5) *Plantio Semi-Mecanizado (PM)*: transplantar as mudas em campo e realizar as bacias de contenção de água de irrigação no centro do sulco de plantio, visando formar povoamentos florestais com elevada sobrevivência, uniformidade e conseqüentemente altas produtividades; 6 e 7) *Irrigação (1 e 2 Irr)*: tem a finalidade de fornecer às mudas o suprimento hídrico necessário ao seu enraizamento inicial. A quantidade de irrigações dependerá do estresse hídrico apresentado pelas mudas em decorrência da época de plantio, podendo variar de uma a três aplicações; 8) *Aplicação Mecanizada de Herbicida Pré-Emergente na Linha (HPEL)*: promove o controle do banco de sementes e evita a germinação de plantas daninhas na linha de plantio; 9) *Replantio (Rep)*: é realizado quando o nível de sobrevivência não atende às exigências da recomendação técnica; 10) *Capina Mecanizada na Linha Pré-Emergente (CMLPE)*: realizado na ocorrência de plantas remanescentes da dessecação ou folhas largas em pós emergência na linha de plantio; 11) *Roçada Mecânica (RM)*: é realizada para controle das brotações de eucalipto advindo dos tocos presentes entrelinha do novo plantio; 12 e 15) *Aplicação Mecanizada de Herbicida Pós-Emergente na Entrelinha (1 e 2 HPEE)*: reduzir a população de plantas daninhas na entrelinha evitando que a mesma migre para a linha de plantio; 14) *Aplicação Mecanizada de Calcário (AMC)*: visa fornecer cálcio e magnésio para a planta e melhorar a disponibilidade de nutrientes as plantas pelo solo; e 16) *1ª Adubação de Cobertura Mecanizada (ACM)*: visa garantir o suprimento de nutrientes para o arranque da planta, aplicando o adubo em filete contínuo ao lado da linha.

Uma série de parâmetros foram estabelecidos para garantir a resolução do problema, sendo: a) horizonte de planejamento (*HP*) define o intervalo de tempo em que as atividades deverão ser executadas, sendo adotado um período de 365 dias; b) periodicidade (*P*): representa o intervalo de tempo que está associada a execução do plano, e por isso a mesma assumiu um valor diário. Essa condição é importante, pois permite um alto grau de detalhamento das atividades ao longo do horizonte de planejamento; c) ordem de serviço (*ODS*): representa uma seqüência de operações necessárias para cada unidade de manejo (talhão). A lista de atividades por talhão é de natureza independente, pois depende de seu *status* operacional. Isso significa que ao identificar a última atividade executada, tem-se a marcação fixa das demais necessárias para o manejo do talhão; d) atividades agendadas: representam as atividades a serem agendadas

e denominadas como operações. A operação de plantio é classificada como operação principal, uma vez que todas as demais são dependentes dela para serem executadas. As demais atividades são classificadas nas seguintes categorias: i) *Operações com status inicial posterior ao plantio*: Por se tratar de um plano que considera a periodicidade diária, os talhões podem se encontrar em diferentes status iniciais dentro da mesma fazenda. Quando a ODS inicia por operações posteriores ao plantio, o agendamento é baseado no primeiro dia disponível para agendar a atividade ($d+1$) para esse talhão e não na operação de plantio. Nas demais categorias apresentadas, as ODS's iniciam por operações que são realizadas antes do plantio e finalizam na 16ª operação que é a adubação mecanizada de cobertura; ii) *Operações anteriores ao plantio*: 1º Combate de formigas (1CF), Manutenção de mini-curvas (MMC), Aplicação de herbicida pós-emergente em área total (HPEAT) e Subsolagem com adubação (SA); e iii) *Operações posteriores ao plantio*: 1ª e 2ª Irrigação (1 e 2Irr), Aplicação de herbicida pré-emergente na linha (HPEL), Replantio (Rep), Capina mecanizada na linha pré-emergente (CMPL), Roçada mecânica (RM), 1ª Aplicação mecanizada de herbicida pós-emergente na entrelinha (1HPEE), 2º Combate de formiga (2CF), Aplicação mecanizada de calcário (AMC), 2ª Aplicação mecanizada de herbicida pós-emergente na entrelinha (2HPEE), Adubação de cobertura mecanizada (ACM).

Do ponto de vista operacional, cada operação é realizada em apenas um talhão, por vez, e possuem parâmetros específicos para quantificar a sua duração, como: i) rendimento (RD) – que representa a unidade em hora por hectare (h/ha) de execução, permitindo calcular o consumo e dimensionar os recursos utilizados. A mão de obra foi adotada como o recurso principal para fins de agendamento, caso a atividade envolva máquinas e mão de obra; ii) grau de realização (GR) - representa o percentual em área que a operação será realizada em cada talhão; iii) eficiência operacional (EO) indica a relação entre o tempo efetivamente utilizado para trabalho e o tempo total em que o equipamento esteve disponível; iv) disponibilidade mecânica (DM) - reflete a porcentagem de tempo em que o equipamento esteve disponível para uso, sem intervenções de manutenções mecânicas; v) taxa de utilização (TU) do recurso que é a porcentagem de tempo de efetivo trabalho.

Uma vez estabelecida a lista de talhões, que cada atividade operacional precisa executar, tem-se então a necessidade de trabalhar o agendamento e sequenciamento, como pontos chave do problema. A variável horas úteis (HU) é de grande importância para essas duas condições, pois corresponde ao tempo necessário para concluir a operação em um talhão específico (horas operadas + horas deslocamento entre talhões). Isso significa que a definição das horas úteis, dentro das janelas de tempo por atividade, deve ser definida conforme as equações [1] e [2], em

que TU – Taxa de utilização percentual, DM - disponibilidade mecânica percentual, EO - eficiência operacional percentual, RD - rendimento (h/ha), A - área do talhão (ha), GR (%) - grau de realização, e D – tempo de deslocamento (h). Vale ressaltar que o tempo de deslocamento, entre dois talhões, é importante para retratar o consumo dessa variável e o cálculo dele é explicado no item 2.2. Por fim, a jornada diária de trabalho (JD), que influencia toda a operação, considerou um valor de 7,92 horas efetivas de trabalho pelas equipes no campo.

$$TU = DM \cdot EO \quad (1)$$

$$HU = (RD \cdot A \cdot GR \cdot TU) + D \quad (2)$$

2.2 Simulador de instâncias operacionais - SIOP

Usualmente, o desenvolvimento e validação de um algoritmo exige o uso extensivo de um conjunto de problemas ou instâncias. Isso permite uma melhor generalização de sua aplicação, no que tange abrangência e taxa de sucesso obtida. Dentro desse ponto, infelizmente, nem sempre é simples a obtenção de dados reais para a geração desses testes. Contudo, o uso da simulação de dados permite uma vantagem significativa, ou seja, gerar um elevado número de instâncias independentes e diversas. Assim, para avaliar a capacidade do algoritmo em resolver o problema proposto, foi criado um simulador de instâncias operacionais SIOP, ou ordens de serviço, na linguagem R, capaz de reproduzir o *status* inicial do talhão e a requisição das operações subsequentes.

Algoritmo: SIOP

Passo 1: Inicializar parâmetros da simulação

1.1. Criar matriz vazia $M1$ (matriz com atividades simuladas para cada talhão)

Passo 2: Gerar atividades para os talhões

Para cada t (talhões) em nt (vetor com talhões por instância):

Para cada s (simulações) de 1 a ns (simulações por instância):

Para cada y de 1 a t :

2.1. Gerar área aleatória no intervalo $[0, amax]$.

2.2. Se y estiver entre os primeiros 60% dos talhões:

- Selecionar aleatoriamente atividades predecessoras ao plantio.

2.3. Senão:

- Selecionar atividades aleatórias, incluindo o plantio.

2.4. Adicionar atividades ao talhão y .

Adicionar informações a $M1$.

Passo 3: Gerar conectividade espacial entre talhões

3.1. Inicializar matrizes $M2$ (matriz com tempos de deslocamento entre talhões) e $M3$ (matriz com informações do grafo de conectividade).

Para cada t em nt :

Para cada s de 1 a ns :

- Extrair talhões correspondentes de $M1$.
- Gerar matriz de adjacência l para conectividade:

3.2. Criar conexões aleatórias entre talhões com no máximo nv vizinhos.

3.3. Garantir que cada vértice tenha pelo menos uma conexão.

- Construir matriz de arestas a partir de l .
- Garantir que o grafo seja conectado:

3.4. Verificar conectividade com algoritmo de Floyd-Warshall.

3.5. Adicionar conexões extras, se necessário, para evitar vértices desconectados.

- Calcular distâncias mínimas entre talhões e converter para tempo.
- Adicionar resultados a $M2$ e $M3$.

FIM

O SIOP estabelece randomicamente as atividades silviculturais (sucessoras e predecessoras ao plantio) a serem realizadas por um dado talhão i , que estão associadas a implantação da cultura do eucalipto, mas que pode perfeitamente ser extrapolado para qualquer cultura. Isso significa que cada talhão i possuía uma lista distinta de 1 a 16 atividades a serem executadas. Essa heterogeneidade de atividades iniciais por talhão é importante, pois esse aspecto representa a realidade de qualquer empresa florestal. Logo, um total de 80 instâncias foram geradas considerando a seguinte estruturação: a) número de talhões $t = \{5, 10, 15 \text{ e } 20\}$ com área máxima de até 60 ha e mínima de 0,01 ha; b) número de 20 repetições randômicas e independentes por classe de número de talhões, estabelecendo novos valores de área (ha) e atividades a serem executadas. A vizinhança (conectividade entre talhões) também se alterava a cada nova repetição. Por fim, atribuiu-se que pelo menos 60% das atividades iniciais seriam de operações anteriores ao plantio, para aumentar a complexidade do problema. Devido a requisição de rotas de deslocamentos entre talhões, para compor a variável hora útil, adotou-se o uso de estruturas matemáticas conhecidas como grafos. Essa espacialização de cada conjunto t estabelece uma conectividade aleatória entre eles, mas que foi fixada em no máximo de 5 talhões. O grafo $G=(V, A)$ gerado é conectado, o que garante a movimentação das equipes entre todos os talhões, independente das distâncias estabelecidas entre si. Utilizou-se algoritmo de Floyd-Warshall no pacote R/igraph (Csardi e Nepusz, 2006) para traçar as rotas ótimas entre todos os talhões pertencentes ao conjunto t . A medida de custo de deslocamento foi convertida

em tempo (horas), sendo obtida pela razão entre a distância euclidiana entre dois vértices (talhões) e uma velocidade média de deslocamento de 30 km/h [3] e [4].

$$DistLin(km) = \frac{\frac{\sqrt{Area1(ha) \times 10.000}}{2} + \frac{\sqrt{Area2(ha) \times 10.000}}{2}}{1.000} \quad (3)$$

$$Custo(horas) = \frac{DistLin(km)}{30\left(\frac{km}{h}\right)} \quad (4)$$

2.3. Constructive heuristic approach to scheduling silvicultural tasks and sequencing teams within time windows (CHESS-W)

O algoritmo foi implementado no ambiente de programação R, utilizando uma abordagem baseada em matrizes binárias e iterações recursivas para alocação de atividades dentro do horizonte de planejamento. A construção inicial consistiu em modelar os intervalos temporais possíveis para a execução de cada operação, respeitando as restrições impostas pelas ODS e JTs. Adicionalmente, a heurística CHESS-W também integra as rotas das equipes entre talhões. A escolha por uma modelagem construtiva específica se justifica pela natureza determinística e altamente restritiva do problema, que dificulta a geração de operadores eficientes em abordagens baseadas em meta-heurísticas, devido à complexidade das regras de negócio envolvidas. Além disso, o elevado número de combinações possíveis, resultado da grande quantidade de operações e talhões interligados, tornaria inviável o uso de programação linear pura, devido à alta demanda por recursos computacionais. A modelagem construtiva, ao incorporar todas as regras de negócio diretamente em sua estrutura, oferece uma solução viável e escalável, capaz de atender às demandas do problema sem comprometer a factibilidade ou a qualidade dos resultados.

As regras de agendamento são baseadas em iterações recursivas envolvendo as atividades e sequenciamento, conforme a definição do estrato de talhões. O estrato contempla um conjunto de talhões que requerem a atividade j em sua ordem de execução. Isso significa que a heurística CHESS-W trabalha de forma independente, por estrato de talhões e operação silvicultural, mas respeitando as regras técnicas operacionais. Há um dilema interessante nesse problema, pois a ordem de execução de uma dada atividade, para um estrato de talhões, pode gerar um conflito temporal de ociosidade ou ainda um alto deslocamento das equipes. Aparentemente, essas condições são complementares quando não há uma restrição de janela de tempo, o que não é o caso específico. Os talhões dessa lista podem não conter uma mesma

sobreposição de janela de tempo, o que expõem o dilema operacional. Assim, adotou-se a criação de uma regra de ordenamento dos talhões, para buscar minimizar esse efeito. Esse ordenamento foi denominado regra *t*, para ampliar as chances de um sequenciamento ideal dos talhões presentes nessa lista. A ação resulta em talhões com janelas de tempo mais próximas e ordenadas de forma crescente pelo primeiro dia da janela. Em caso de mesmo status inicial, foi considerado a menor distância de deslocamento. Uma matriz binária foi construída com dimensões correspondentes ao número de operações e dias do horizonte de planejamento, para controlar todas as ações da heurística CHESW. Os valores binários indicam a indisponibilidade {0} ou disponibilidade {1} para realizar uma operação em um determinado dia.

A primeira regra heurística considera a alocação da atividade principal (plantio) por talhão, as demais são ajustadas conforme dependência temporal do plantio e suas respectivas janelas de tempo. Assim, fica lógico que cada operação possui um conjunto de talhões a serem agendados e sequenciados, permitindo dessa forma que a heurística CHESW busque minimizar a ociosidade e o *makespan*. A ociosidade é definida como o tempo improdutivo dentro da jornada de trabalho, sendo reduzida por meio do sequenciamento eficiente das operações, garantindo o máximo aproveitamento da carga horária diária. Já a redução do *makespan*, que corresponde ao término de execução da última atividade, é obtida ao agendar as atividades o mais próximo possível do início das janelas de tempo específicas para cada uma. Essa abordagem garante maior eficiência no uso das equipes e equipamentos, além de assegurar o cumprimento dos prazos operacionais estabelecidos.

Devido ao alto grau de detalhamento exigido, duas regras foram impostas para garantir a dinâmica no uso das horas dentro da janela de tempo/talhão e entre talhões de mesma atividade. Isso é importante para garantir o roteamento entre talhões, evitando ociosidades. A primeira condição ($HU > JD$), ou seja, talhões gastam mais que 7,92 horas para serem finalizados para uma determinada operação, gerando dessa forma, “sobras” de horas para serem alocadas nos próximos dias ($d+1$). Caso essa “sobra” em horas for menor que a JD do dia seguinte, o próximo talhão é alocado no mesmo dia até atingir a JD e assim sucessivamente. A segunda condição ($HU \leq JD$) representam talhões com consumo inferior a 7,92 horas para a finalização de uma determinada operação. Nesses casos, o próximo talhão é agendado no mesmo dia até finalização da JD. As regras de alocação seguiram as seguintes etapas principais, respeitando as restrições da matriz binária de intervalos e as JTs previamente definidas:

- a) Ordem de talhões para a execução da atividade *j*: os talhões da atividade *j* foram organizados segundo a regra *t*, sendo o plantio a primeira atividade a ser agendada;

- b) Verificação do Primeiro Talhão: Para o primeiro talhão na ordem definida, foi avaliado o início do intervalo binário disponível na matriz. Caso as $HU \leq JD$, os recursos foram alocados diretamente no primeiro dia disponível da janela de trabalho. Quando $HU > JD$, foi realizado o agendamento das $HU = JT$ para o primeiro dia disponível, calculando e agendando as "sobras" de horas para os dias subsequentes;
- c) Alocação Sequencial de Talhões: Para talhões subsequentes ao primeiro ($i+1$), o modelo considerou a "sobra" de horas do talhão anterior para avaliar o agendamento: Se o intervalo binário do talhão atual (i) permitia alocar as $HU(i) + Sobras(i-1)$ no mesmo dia do anterior e dentro da JT, o algoritmo ajustava os recursos no dia correspondente e recalculava as $sobras(i)$. Caso contrário, o agendamento era feito em sequência ao anterior, respeitando o intervalo binário disponível;
- d) Tratamento de Conflitos de Intervalos Binários: quando o intervalo binário do talhão atual não permitia sua alocação sequencial com o anterior, o algoritmo buscava reorganizar os talhões já agendados para acomodar o talhão atual: *Reorganização Possível*: Se todos os talhões anteriores podiam ser deslocados sem violar seus intervalos binários, o deslocamento era realizado, e o talhão atual era alocado em sequência. *Reorganização Impossível*: Quando o deslocamento dos talhões anteriores não era viável, o talhão atual era agendado no primeiro dia disponível do seu intervalo binário. Nesse caso, era gerado um acréscimo de ociosidade devido à quebra da sequência lógica;
- e) Cálculo de ociosidades (O): A diferença de dias gerada pelo agendamento de forma não sequencial dos talhões ordenados, é calculado como horas ociosas (O) [5]. Elas são computadas ao final de cada recursividade de operação.

$$O = \sum JD + (JD - sobras_{(i-1)}) \quad (5)$$

Quando não foi possível agendar um talhão na sequência do anterior, o procedimento registrou o tempo ocioso gerado pela descontinuidade, priorizando o respeito aos intervalos binários sobre a eficiência do sequenciamento.

Algoritmo: CHESS-W

Passo 1: Importação e integração de dados:

- 1.1. Importar as matrizes básicas de cadastro, recursos, rendimento.
 - 1.2. Construir a matriz de intervalo unindo as tabelas:
- Integrar operações futuras e cadastro de talhões.

- Calcular horas e dias necessários para cada operação considerando rendimentos, deslocamentos e janelas de tempo.

1.3. Adicionar uma matriz binária de 365 colunas (dias do horizonte de planejamento) para controle das alocações.

Passo 2: Geração da matriz de intervalos

2.1. Iterar por cada fazenda na matriz de intervalo:

Para cada i (talhão) em f (fazenda):

- Determinar o intervalo de plantio (caso aplicável).

- Definir intervalos para demais atividades considerando dependências temporais e restrições de janelas.

Ajustar a matriz binária para indicar dias disponíveis (1) ou indisponíveis (0).

Garantir que talhões não sejam duplicados na matriz de controle.

FIM-Enquanto (1)

Passo 3: Geração da matriz de alocação

Para cada f em nf (número de fazendas total):

3.1. Inicializar a matriz para registrar alocações.

3.2. Alocação da atividade primária (plantio):

Para cada i em f :

- Identificar o primeiro dia disponível na matriz binária.

- Alocar recursos considerando horas trabalhadas e tempo de deslocamento.

- Ajustar dias excedentes para o próximo talhão, respeitando a jornada de trabalho.

Registrar s (sobras de horas não utilizadas).

3.3. Alocação das atividades secundárias:

- Ordenar atividades pela **regra t** (prioridade temporal e espacial).

Para cada a (atividade) e i (talhão):

- Avaliar a possibilidade de sequenciamento com o talhão anterior.

- Reorganizar talhões anteriores, se necessário, para acomodar a nova atividade.

- Alocar atividades dentro das janelas temporais disponíveis.

- Registrar s e ajustar alocações.

Passo 4: Tratamento de conflitos e otimização

Para cada conflito de sobreposição:

4.1. Identificar operações sobrepostas.

4.2. Recalcular e deslocar as operações conflitantes para eliminar sobreposições, garantindo o respeito às janelas binárias.

4.3. Ajustar todas as operações afetadas no conjunto global.

Passo 5: Registro da matriz final

5.1. Consolidar todas as alocações e exportar resultado para análise.

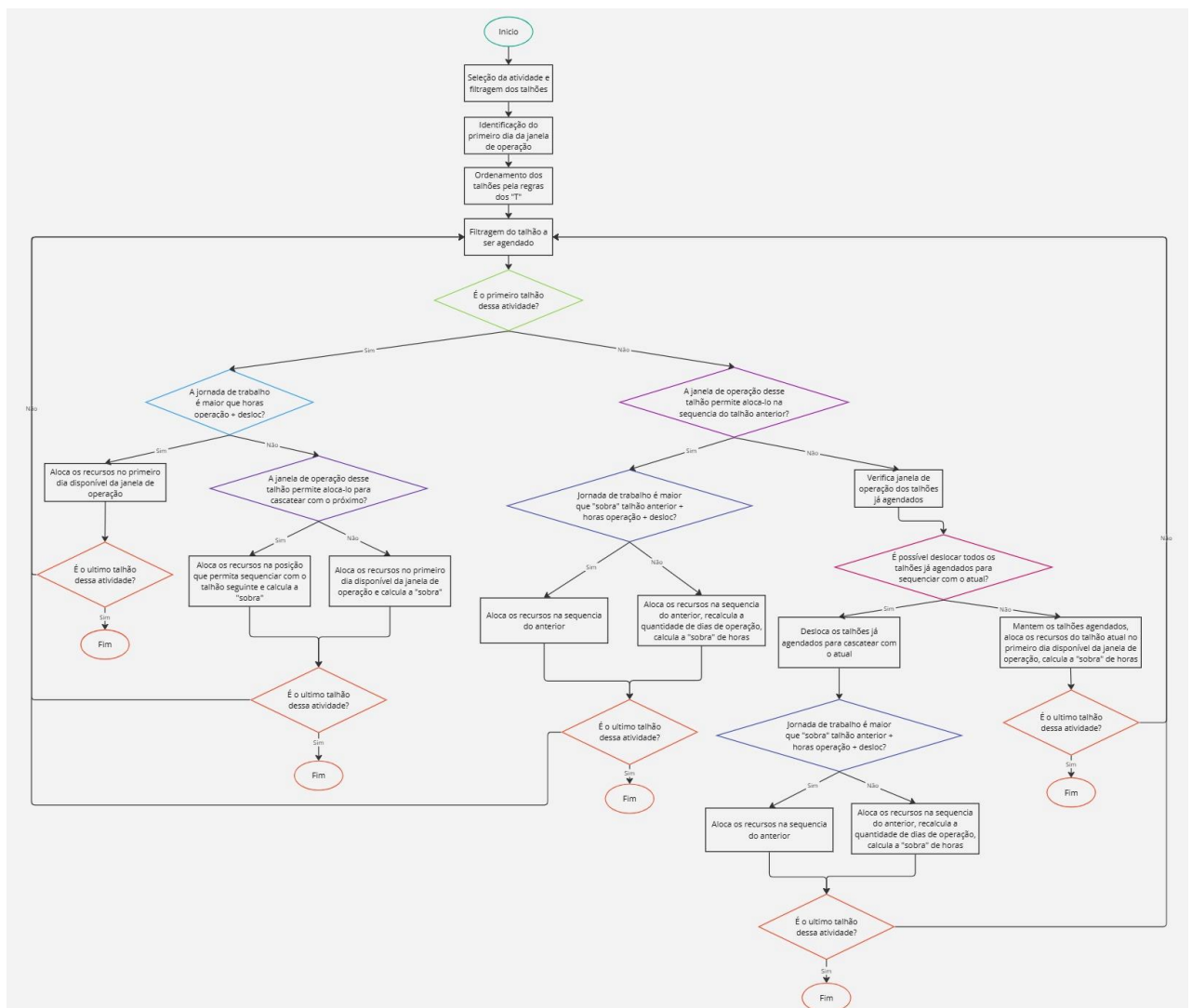
5.2. Geração de métrica de desempenho (*makespan*) e tempo de processamento.

FIM-Enquanto (2)

FIM

As soluções geradas pela heurística CHESW para cada instância foram avaliadas utilizando um conjunto abrangente de métricas, que inclui: o tempo de processamento do algoritmo, como indicador de eficiência computacional; o tempo ocioso acumulado por fazenda e operação, que reflete a eficácia na alocação de recursos e no aproveitamento da jornada de trabalho; as horas úteis totais alocadas por fazenda e operação, avaliando a capacidade do algoritmo em distribuir as atividades dentro das janelas temporais disponíveis; e o nível de aderência às restrições operacionais e janelas temporais estabelecidas. A Figura 6 apresenta as regras técnicas utilizadas para construção do algoritmo.

Figura 6 - Regras de negócio – Atividade de plantio



Fonte: do Autor (2025).

2.4. Cenário real aplicado de teste

Considerando um cenário real de operação florestal, foram selecionadas quatro fazendas sob regime de reforma, operadas no período de 2022 a 2024. Essas fazendas foram escolhidas a partir de um banco de dados corporativo disponibilizado pela empresa. Para cada fazenda foram selecionadas algumas operações compatíveis com as abordadas nesse trabalho (Tabela 2). Por fim, foi adotado o mesmo regime de jornada de trabalho (7,92 horas) como base para o cálculo das horas efetivamente trabalhadas, mas não foi possível obter as informações de deslocamento real realizada pelas equipes. A título comparativo com a eficiência da heurística CHESS-W, foi calculado o desvio em relação à janela operacional de cada atividade pela diferença entre os dias médios de realização de cada operação e a data de referência do plantio, possibilitando a análise temporal e a identificação de variações operacionais em relação à janela de tempo.

Tabela 2 - Fazendas com suas respectivas áreas e operações realizadas.

Fazendas	Área (ha)	Operações silviculturais agendadas
A	1331	1CF(3), MMC(4), HPEAT(4), SA(4), HPEL(4), AMC(4) e 2HPEE(4)
B	417,41	1CF(8), HPEAT(10), SA(10), HPEL(10), CMPL(10), AMC(10), 2HPEE(10) e ACM(10)
C	489,88	1CF(3), HPEAT(14), SA(14), HPEL(14), CMPL(14), AMC(14) e ACM(14)
D	523,24	1CF(3), MMC(13), HPEAT(15), SA(15), HPEL(15), CMPL(15), AMC(15), 2HPEE(15) e ACM(15)

1CF: 1º Combate de formiga manual; MMC: Manutenção de mini-curva; HPEAT: Aplicação de herbicida pré-emergente em área total; SA: Subsolagem com adubação; HPEL: Aplicação mecanizada de herbicida pré-emergente na linha; Rep: Replanteio; CMPL: Capina mecanizada na linha pré-emergente; RM: Roçada mecânica; 1HPEE: 1ª Aplicação mecanizada de herbicida pós-emergente na entrelinha; 2CF: 2º Combate de formiga manual; AMC: Aplicação mecanizada de calcário; 2HPEE: 2ª Aplicação mecanizada de herbicida pós-emergente na entrelinha; ACM: 1ª Adubação mecanizada de cobertura; () número de talhões por atividade. Fonte: do Autor (2025).

3. RESULTADOS

3.1. Capacidade de uso do SIOP

Um simulador de ordens de serviço precisa ser assertivo na geração de instâncias, sem qualquer tipo de viés. Os resultados gerados não podem favorecer a heurística, e por isso precisam de uma generalização confiável ao problema silvicultural em questão. O simulador SIOP demonstrou ser robusto, ao gerar ordens de serviço, independente da variação quanto a densidade de talhões {5, 10, 15 ou 20 talhões} por fazenda ou instância individualizada. A

magnitude e abrangência de instâncias permitiu gerar um total de 966 talhões distintos e independentes, abrangendo uma área acumulada de 28.635,35 hectares. Esse valor absoluto é um indicativo de sua capacidade ilimitada de simulação, tanto na questão de área, atividades silviculturais, e dependências espaciais na forma de grafos. A título ilustrativo, a Tabela 3 apresenta a estrutura de agendamento para uma dada fazenda simulada com 140,14 ha, contendo informações sobre os talhões e as operações previstas para a execução.

Tabela 3 - Ordens de serviço geradas pelo simulador SIOP para uma dada fazenda (instância).

Talhões	Área (ha)	Operações silviculturais a agendar												
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a	12 ^a	13 ^a
1	29,16	PM	1Irr	2Irr	HPEL	Rep	CMPL	RM	1HPEE	2CF	AMC	2HPEE	ACM	-
2	20,05	SA	PM	1Irr	2Irr	HPEL	Rep	CMPL	RM	1HPEE	2CF	AMC	2HPEE	ACM
3	53,08	2CF	AMC	2HPEE	ACM	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	11,17	AMC	2HPEE	ACM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	26,68	2Irr	HPEL	Rep	CMPL	RM	1HPEE	2CF	AMC	2HPEE	ACM	-	-	-

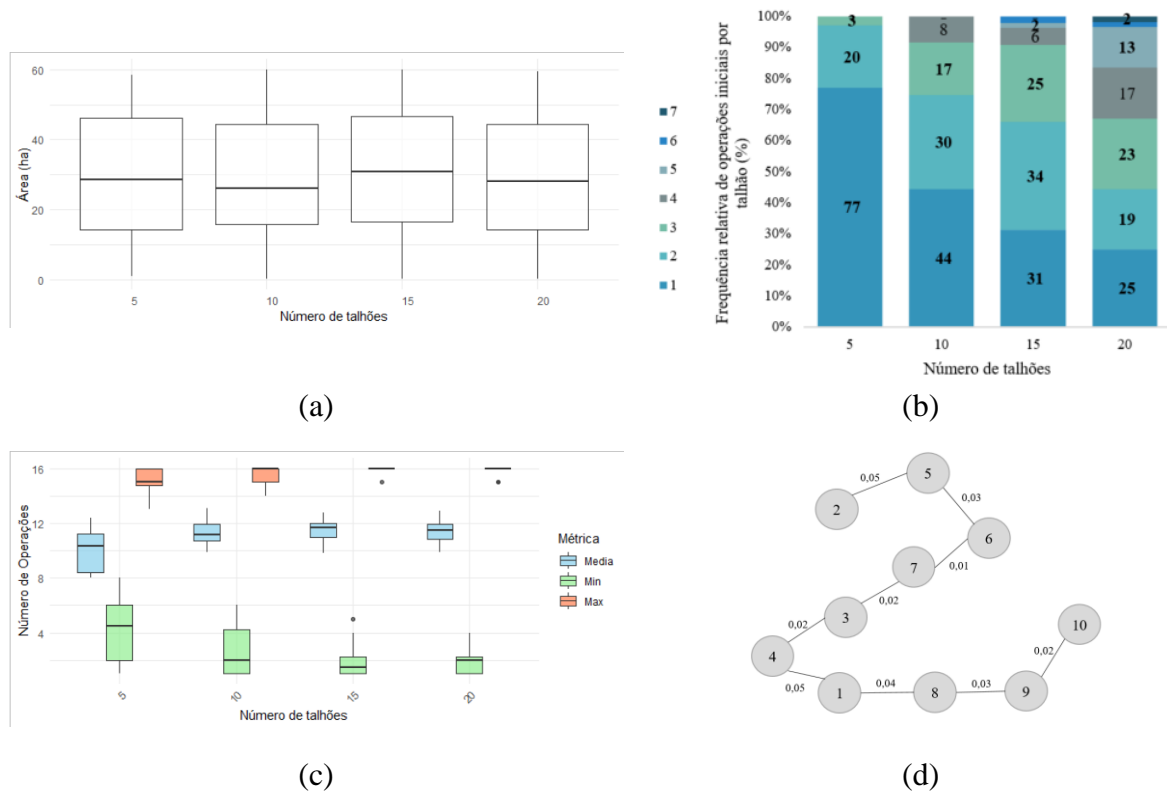
PM: Plantio semi-mecanizado; 1Irr: 1 Irrigação; 2Irr: 2 Irrigação; HPEL: Aplicação mecanizada de herbicida pré-emergente na linha; Rep: Replântio; CMPL: Capina mecanizada na linha pré-emergente; RM: Roçada mecânica; 1HPEE: 1^a Aplicação mecanizada de herbicida pós-emergente na entrelinha; 2CF: 2o Combate de formiga manual; AMC: Aplicação mecanizada de calcário; 2HPEE: 2a Aplicação mecanizada de herbicida pós-emergente na entrelinha; ACM: 1^a Adubação mecanizada de cobertura; SA: Subsolação com adubação. Fonte: do Autor (2025).

A Figura 3-a apresenta o comportamento, em área dos talhões, quanto a seu número por instância. É possível observar que a mediana das áreas é relativamente consistente entre os grupos, variando em torno de 30 a 35 hectares. Esse valor é condizente com as áreas reais em projetos florestais no Estado do Mato Grosso do Sul. Por outro lado, talhões com valores mínimos (<5 ha) e máximos (55 a 60 ha) estão distribuídos de forma similar entre os agrupamentos, como esperado. Assim, independentemente do número de talhões por fazenda, a distribuição das áreas é homogênea, sem grandes variações ou *outliers* significativos, o que pode indicar uma padronização no planejamento das áreas dos talhões. Logo, fica evidente que o simulador é capaz de gerar instâncias heterogêneas em área.

Na Tabela 4 observa-se que, nas cinco primeiras fazendas geradas pelo simulador SIOP, em quatro delas cada talhão inicia a Ordem de Serviço (ODS) com uma operação distinta. Apenas na Fazenda 5, dois talhões compartilham a mesma operação inicial na ODS (talhões 2 e 3, operação inicial SA). Destaca-se que, dentre as operações iniciais das ODS, pelo menos uma operação é predecessora ao plantio em cada fazenda. Ao expandir essa análise para todas as fazendas (Figura 3-b), identificou-se uma tendência interessante: a) Fazendas com 5 talhões apresentam, em 77% dos casos, todos talhões com operações iniciais diferentes; b) Fazendas com 10 talhões possuem 44% de talhões com status inicial distintos; c) Fazendas com 15 talhões

têm 31% de variação nas operações iniciais entre os talhões; e d) Fazendas com 20 talhões apresentam apenas 25% de talhões com operações iniciais diferentes. Essa heterogeneidade nas operações iniciais representa um fator significativo para o aumento da complexidade do problema de sequenciamento, pois implica uma maior variabilidade na localização das janelas temporais ao longo do horizonte de planejamento. Essa dinâmica exige do algoritmo uma capacidade robusta de gestão de conflitos temporais, considerando a aderência às restrições impostas pelas janelas de tempo específicas para cada operação.

Figura 7 - Variação em área dos talhões por agrupamento de fazendas ou instâncias.



Legenda: (a), porcentagem de talhões com diferentes status operacionais iniciais por grupo de fazenda (b), distribuição de número de operações por talhão nas fazendas (c) e grafo com o tempo em horas para o deslocamento (d) gerados pelo simulador SIOP.

Tabela 4 – Número de operações por talhão, denominação da primeira atividade e indicação de atividades predecessoras ao plantio para fazendas de 1 a 5.

Talhões	Fazendas				
	1	2	3	4	5
1	PM (13)	MMC* (16)	SA* (14)	HPEAT* (15)	PM (13)
2	SA* (14)	1CF* (17)	MMC* (16)	SA* (14)	SA* (14)
3	2CF (4)	2HPEE (2)	PM (13)	PM (13)	SA* (14)
4	AMC (3)	AMC (3)	HPEAT* (15)	HPEL (10)	HPEAT (15)
5	2Irr (11)	2CF (4)	ACM (1)	1HPEE (5)	1HPEE (5)

* atividades a serem realizadas antes do plantio e () número da atividade. Fonte: do Autor (2025).

É possível observar ainda a distribuição de operações por talhão para diferentes grupos de fazendas por número de talhões, destacando as métricas de Média, Mínimo e Máximo (Figura 7-c). Observa-se que a média das operações por talhão varia moderadamente entre os agrupamentos, enquanto o mínimo exibe uma maior dispersão, com valores próximos a zero em alguns casos, indicando talhões com baixa demanda operacional. Por outro lado, o máximo se mantém consistentemente elevado, próximo de 16, refletindo talhões com alta complexidade operacional em todos os agrupamentos. Há uma maior heterogeneidade nas demandas operacionais de talhões menos utilizados. Além disso, a amplitude entre mínimo e máximo evidencia um alto grau de variação entre talhões dentro de um mesmo agrupamento, o que pode representar desafios para o sequenciamento. No geral, o gráfico sugere uma distribuição operacional assimétrica, com talhões altamente exigentes coexistindo com talhões de baixa demanda, reforçando a necessidade de estratégias personalizadas para gestão eficiente. A dispersão espacial dos dados, também é semelhante entre os grupos, indicando que as áreas dos talhões apresentam variações moderadas e consistentes em cada agrupamento.

3.2. Performance e desempenho da heurística CHESW

O simulador de instâncias gerou um total de 80 fazendas simuladas e por meio da aplicação da heurística CHESW foram agendadas 122.468,18 horas úteis, sendo em média 1.531,1 horas/fazenda no planejamento operacional da silvicultura. Desse total, aproximadamente 74,8% (91.663,64 horas úteis) foram efetivamente sequenciadas, resultando em uma média de 1.145,8 horas/fazenda de forma contínua e sem ociosidades. Importante destacar que cada fazenda foi planejada individualmente, sem considerar a integração operacional entre elas. O tempo de processamento do algoritmo no software R foi de 54,56 segundos para montagem da matriz binária e 679,94 segundos para cálculo das métricas, agendamento e sequenciamento das horas úteis (HU) para os talhões e atividades das 80 fazendas geradas pelo simulador SIOP. O tempo médio de processamento de cada fazenda, independente da dimensão do problema testado foi de 8,49 segundos, um valor relativamente rápido para a geração de respostas viáveis ao tomador de decisão. Como esse planejamento se deu por fazenda individualmente, as horas de deslocamento total das equipes entre os talhões apresentaram um valor reduzido, totalizando 521,45 horas, 0,43% das horas agendadas. O tempo de deslocamento é reduzido, quando comparado com a execução das atividades, pois não trabalhou a integração do deslocamento entre fazendas, ou seja, os tempos de deslocamento desse trabalho são referentes ao deslocamento entre talhões. O objetivo foi trabalhar cada

instância separadamente, porém, na prática o deslocamento entre talhões é de 6,52 horas/fazenda, em média.

A partir do aumento do número de talhões por fazenda, conforme observado na Tabela 5, identificou um aumento consistente das horas médias agendadas e sequenciadas à medida que o número de talhões cresce, evidenciado pelos valores médios crescentes de 555,17 horas (5 talhões) para 2.402,50 horas (20 talhões) nos agendamentos e de 307,14 horas (5 talhões) para 1.925,46 horas (20 talhões) para os sequenciamentos. O percentual de sequenciamento também aumenta de forma significativa, de 55,13% para 80,09%, indicando maior eficiência operacional com o aumento da quantidade de talhões. O desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) das horas agendadas e sequenciadas diminuem com o aumento dos talhões, indicando maior estabilidade e menor dispersão nos valores. Embora o *makespan* apresente um leve incremento conforme o número de talhões aumenta, ele não cresce proporcionalmente às outras variáveis, indicando que a adição de talhões é absorvida de forma eficiente no tempo total de execução. A redução percentual do *makespan* diminui levemente com o aumento dos talhões, de 36,58% para 32,62%, refletindo uma eficiência que se estabiliza à medida que o número de talhões cresce e evidenciando a eficiência da heurística em compactar o planejamento e minimizar o uso desnecessário do tempo.

Tabela 5 - Análise estatística da capacidade da heurística em resolver os problemas silviculturais nas 80 fazendas simuladas pelo algoritmo SIOP.

(Continua)

Número de Talhões	Métricas	Horas úteis (h)		Sequenciamento (%)	Makespan	
		Agendadas	Sequenciadas		Duração (dias)	Redução (%)
5	Média	555,17	307,14	55,13	231,50	36,58
	Desvio	153,45	127,83	15,96	14,90	4,08
	CV (%)	27,64	41,62	28,96	6,44	11,16
	Mínimo	258,30	96,03	18,14	202,00	32,33
	Máximo	809,60	577,20	82,59	247,00	44,66
10	Média	1.169,98	782,09	66,55	239,65	34,34
	Desvio	265,38	229,62	9,45	11,14	3,05
	CV (%)	22,68	29,36	14,20	4,65	8,88
	Mínimo	769,15	483,95	45,58	213,00	30,68
	Máximo	1.651,20	1.266,40	78,80	253,00	41,64
15	Média	1.996,66	1.568,50	78,97	248,15	32,01
	Desvio	452,12	338,19	5,33	5,23	1,43
	CV (%)	22,64	21,56	6,75	2,11	4,48
	Mínimo	1.141,59	914,23	68,34	230,00	30,14
	Máximo	2.806,47	2.227,57	85,98	255,00	36,99

Tabela 5 - Análise estatística da capacidade da heurística em resolver os problemas silviculturais nas 80 fazendas simuladas pelo algoritmo SIOP.

(Continuação)

Número de Talhões	Métricas	Horas úteis (h)		Sequenciamento (%)	Makespan	
		Agendadas	Sequenciadas		Duração (dias)	Redução (%)
20	Média	2.402,50	1.925,46	80,09	245,95	32,62
	Desvio	319,78	280,57	3,56	5,92	1,62
	CV (%)	13,31	14,57	4,45	2,41	4,97
	Mínimo	1.726,26	1.340,25	72,50	231,00	29,32
	Máximo	3.007,89	2.490,22	84,75	258,00	36,71

CV (%) - Coeficiente de variação. Fonte: do Autor (2025).

A ociosidade das equipes no sequenciamento entre talhões, podem ser analisadas de duas maneiras diretas; a) período inferior a 5 dias corridos e b) período superior a 5 dias corridos. Essa distinção é necessária devido a heterogeneidade das atividades a serem agendadas, o que gera naturalmente uma desconectividade entre os talhões pela mesma atividade. Isso significa que as janelas de execução não ocorrem de forma síncrona, sobrepondo-as no horizonte de planejamento. Logo, há momentos em que é impossível o sequenciamento, e com isso não se pode penalizar a heurística como uma falha em sua lógica, mas sim atribuídas às condições silviculturais e ao processo aleatório de geração da instância. Esses casos podem ser considerados reais e o não sequenciamento, a única opção viável para respeitar a janela de tempo de cada atividade. Assim, considerando a primeira opção (< 5 dias = 36,9 horas) há uma contabilização de 5.999,51 horas de não trabalho, correspondente a 4,9% das horas agendadas que são classificadas como falha na heurística CHESS-W (Tabela 6). Diferenças maiores que essas foram classificadas como momentos diferentes de entrada na fazenda para realização da mesma operação (20,3% das horas agendadas). A atividade que mais apresentou horas ociosas foi a HPEL que corresponde a 54,03% da ociosidade acumulada. Isso se deve possivelmente à diferença em rendimento dessa operação comparada ao plantio juntamente à pequena janela de tempo para realização dessa operação, fazendo com que o ritmo de execução da HPEL seja mais acelerado que do plantio, reduzindo a possibilidade de sequenciamento. Como a janela de execução dessa operação é de somente 5 dias reduz a possibilidade de a heurística movimentar os talhões já sequenciados ao longo da janela de tempo.

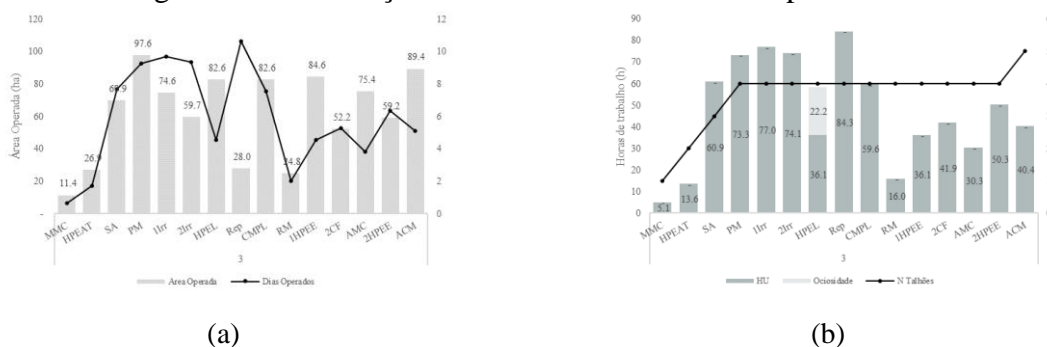
Tabela 6 – Identificação das ociosidades acumulada por tipo de operação silvicultural.

Tipo de operação	Horas Ociosas (h)	Valor percentual (%)
HPEL	3.241,59	54,03
RM	1.449,47	24,16
2CF	664,59	11,08
2Irr	213,54	3,56
1Irr	135,85	2,26
1HPEE	130,19	2,17
2HPEE	77,57	1,29
AMC	58,9	0,98
ACM	22,63	0,38
CMPL	5,18	0,09
Total Geral	5.999,51	100,00

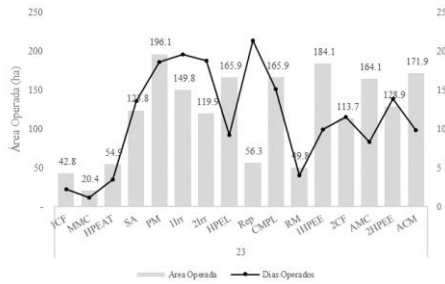
Fonte: do Autor (2025).

A Figura 8 apresenta uma fazenda média de cada agrupamento de talhões representando a área e quantidade de dias operados por atividade (Figura 8-a). Nas quatro fazendas apresentadas é possível observar maior rendimento das operações HPEL, 1HPEE, AMC e ACM em detrimento do baixo rendimento da operação Rep. Refletindo no acúmulo de horas ociosas para a operação HPEL em todas fazendas simuladas (Figura 8-b). Esse reflexo não é similar às demais operações com maiores rendimentos pois a janela operacional delas é mais flexiva. Já no caso da operação Rep, seu baixo rendimento não reflete em ociosidade pois o Grau de Realização (GR) dessa operação também é baixo (0,25%). Nas fazendas simuladas de número 47 e 80 é possível observar o reflexo da segunda e terceira posição em acúmulo de horas ociosas pelas operações RM e 2CF. Apesar do estável rendimento dessas operações, elas apresentam um baixo GR, sendo 0,3% e 0,5% respectivamente ocasionando aumento do ritmo operacional com relação ao plantio.

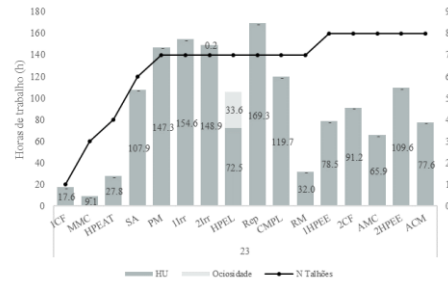
Figura 8 – Distribuição de área e horas trabalhadas por talhão.



---- 5 talhões ----

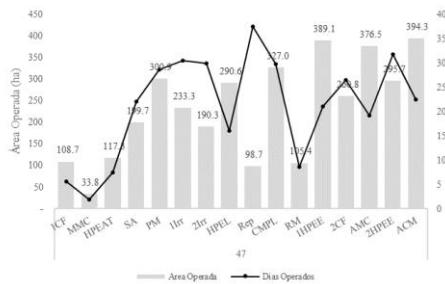


(a)

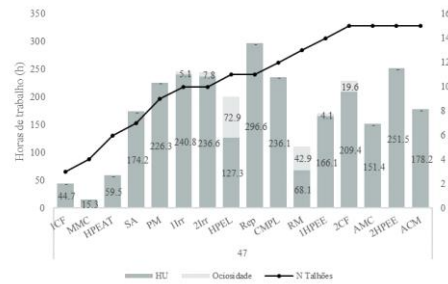


(b)

---- 10 talhões ----

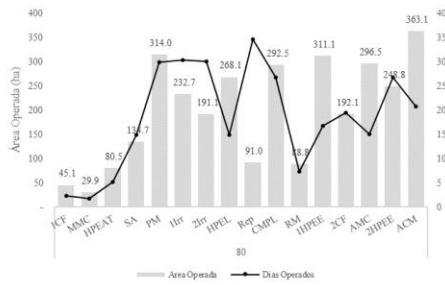


(a)

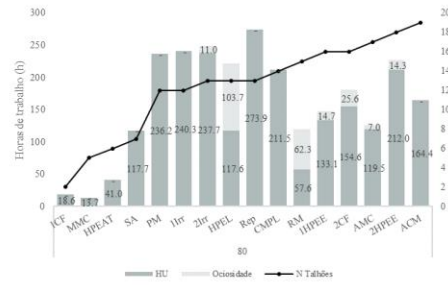


(b)

---- 15 talhões ----



(a)



(b)

---- 20 talhões ----

Legenda: Distribuição por operação de área e dias trabalhados (a); HU e ociosas e número de talhões (b).

A Tabela 7 apresenta o agendamento e sequenciamento das operações ao longo dos talhões da Fazenda 2. Nela é possível observar que os talhões foram sequenciados até a operação 1HPEE. A partir da operação 2CF foram necessárias mais de uma entrada na fazenda para realização da mesma operação, pois a janela de tempo dos talhões a serem operados são completamente diferentes. Mesmo devido a complexidade apresentada foi possível observar que a heurística CHES-W conseguiu sequenciar os talhões 5 e 4 para a atividade AMC e os talhões 4 e 3 para atividade 2HPEE, evitando a ociosidade entre esses talhões avaliados.

Quando comparada a heurística CHESS-W com o cenário real é possível observar que operacionalmente o sequenciamento dos talhões é priorizado, em detrimento às condicionantes impostas pelas janelas de tempo das operações. Isso significa, que os técnicos que planejam a atividade em alguns casos optam pela redução de custo em deslocamento e ociosidade em detrimento às regras de janelas de tempo das recomendações técnicas. Por meio da Tabela 7 é possível observar as horas agendadas e sequenciadas das atividades

Logo, a composição final de uso em horas e o sequenciamento, tende a ser uma solução aproximada ao abordar as regras técnicas, e por isso falha na comparação com a heurística CHESS-W. Por meio da Tabela 8 é possível observar as fazendas selecionadas do cenário real, a quantidade de operações por fazenda e média geral, as horas agendadas e sequenciadas dessas fazendas, o percentual de sequenciamento e a média de desvio do cumprimento da janela de tempo, para facilitar a comparação foi adicionado um resumo da média de número de atividades, horas agendadas e sequenciadas pela heurística CHESS-W, o percentual de sequenciamento e a média de desvio com relação às janelas de tempo. Como a heurística foi programada para atender incondicionalmente as janelas de tempo, sua eficiência de sequenciamento apresenta um valor cerca de 23,5% menor que a operacional, mas em compensação, esse modelo garante que as recomendações técnicas de janela de tempo serão garantidas para todas as atividades, restrição essa que se apresenta mais flexível no cenário operacional, com um desvio médio de cerca de 20 dias com relação à norma técnica para as fazendas consideradas.

Tabela 8 – Resumo por fazenda das horas agendadas e sequenciadas das fazendas do cenário real e comparação com a média por fazenda da heurística CHESS-W.

Fazendas	N de atividades	Horas úteis (HU)		Sequenciamento (%)	Média Desvio JT (dias)
		Agendadas	Sequenciadas		
A	7	201,73	193,81	96,43	40,32
B	8	546,48	538,56	98,44	22,38
C	7	360,61	356,45	98,49	10,08
D	9	658,17	658,17	100,00	5,93
Total Real	7,75	441,8	436,8	98,3	19,7
Total Heurística	11,24	1.531,1	1.145,8	74,8	0

No intuito de avaliar o efeito da amplitude da janela de tempo no sequenciamento pela heurística CHESS-W, um pequeno ajuste foi realizado no tempo operacional da atividade HPEL responsável maioria das horas ociosas (54,03%). A janela de tempo dessa atividade é de 10 a 15 dias após o plantio, então ela foi ampliada para o intervalo de 10 a 20 dias, ou seja,

adicionou-se apenas 5 dias. Os resultados mostram uma redução em 61% da ociosidade observada anteriormente nessa operação, passando de 3.241,59 para 1.257,35 horas, e não afetando as demais atividades agendadas. Partindo do senso lógico obtido pela ampliação da janela de tempo, as atividades RM (24,16%) e 2CF (11,08%) poderiam ser alteradas para um melhor benefício da otimização do recurso. Essas amplitudes reforçam a ideia da busca constante pela melhoria de qualquer sistema operacional, desde que não altere a performance biológica da espécie e seu manejo.

4. DISCUSSÃO

As regras de negócio para a construção da heurística CHESW foram baseadas em um cenário real de manejo silvicultural, com o objetivo de direcionar o microplanejamento silvicultural em nível de fazenda. Essa abordagem permite o ordenamento dos talhões a serem operados diariamente, propondo um planejamento dinâmico com atualizações diárias ou semanais para tornar as operações mais assertivas frente às metas orçamentárias da empresa.

Os resultados apresentados evidenciam a capacidade de abrangência do simulador SIOP em gerar diferentes ODS's. O desenvolvimento do SIOP foi essencial para trazer mais robustez à heurística CHESW pois através dele foi possível obter maior flexibilidade quanto ao desafio de conseguir uma massa de dados e possibilidades tão expressiva quanto a gerada pelo SIOP. Com uma gama de 80 fazendas com distintas ordens de serviço para cada um dos 966 talhões gerados, foi possível modelar a heurística CHESW de forma a torna-la adaptada para agendar e sequenciar talhões que estejam nos mais diferentes status operacionais. Quanto a heurística CHESW, os resultados evidenciaram uma boa acurácia para o agendamento das operações. No entanto, foram identificadas oportunidades de melhoria relacionadas à geração de ociosidade no sequenciamento. Com a extensão da JT da operação que gerou mais horas ociosas (HPEL) o resultado apresentado foi muito interessante, impactou em uma redução de mais de 33% nas horas ociosas quando comparado com o cenário original. Isso se deve pelo aumento de possibilidade de movimentação da heurística dos talhões já sequenciados ao longo da janela de tempo. Outras opções a serem testadas em trabalhos futuros, seria incorporar sorteios ou entradas parametrizadas com modelos probabilísticos, permitindo um novo ordenamento dos talhões ou ajustes na alocação de recursos e rendimentos operacionais.

Mendonça (2016) utilizou métodos exatos e meta-heurísticos que incorporavam estratégias de penalização nas funções de avaliação. Essas penalizações foram eficazes em reduzir a probabilidade de escolha de soluções inviáveis, o que destaca uma oportunidade de

evolução para a heurística CHESS-W. Trabalhos futuros poderiam explorar a integração de cenários de incerteza na modelagem, aumentando as chances de reordenamento dos talhões e minimizando a ociosidade. A comparação entre o cenário real de agendamento operacional e a heurística CHESS-W mostrou que o sequenciamento foi priorizado em detrimento da flexibilidade das janelas de tempo. Em ambientes corporativos o viés econômico, muitas vezes é priorizado em detrimento de aspectos técnicos. Os custos relacionados a deslocamento de pessoas, máquinas e todo aparato estrutural para sustentar a “estadia” das equipes em campo são muito onerosos e trabalhosos, sendo assim, o planejamento operacional muitas vezes opta por somente uma entrada na fazenda. É importante ressaltar que essa priorização do sequenciamento não acontece de forma linear para todas as operações, há atividades em certos períodos do ano em que o silvicultor enxerga essa oportunidade, como é o caso das operações de controle de plantadas daninhas em épocas de menores precipitações hídricas e manutenção de mini curvas em épocas de elevadas precipitações. A ausência de modelagem estocástica na CHESS-W é um ponto a ser considerado para trabalhos futuros.

Silva (2019) demonstrou que a utilização de cenários de simulação estocástica pode ampliar a eficiência de modelos de planejamento. Em seu estudo, foi possível sugerir áreas adicionais para contratação de fomentos sob condições incertas, garantindo o abastecimento de madeira com custos controlados. Além disso, o modelo forneceu dados estratégicos para prever impactos de variáveis críticas, como a produção florestal e os custos logísticos, auxiliando na antecipação de estratégias de contratação. A aplicação da heurística a outras atividades além do planejamento silvicultural também pode ser explorada. A CHESS-W foi projetada para lidar com a complexidade de 16 operações silviculturais, incluindo sobreposição de janelas de tempo. Assim, sua aplicação em atividades menos complexas, como o planejamento de colheita, pode ser uma alternativa viável, demonstrando a versatilidade do modelo.

5. CONCLUSÃO

O problema de agendamento/sequenciamento de atividades florestais na silvicultura é um problema combinatorial complexo que requer algoritmos robustos para a sua resolução. As regras a serem seguidas e impostas pelo problema eleva a dificuldade no desenvolvimento computacional, mas tende a ser uma opção mais interessante que o método exato, mesmo este não sendo testado no trabalho. A heurística CHESS-W desenvolvida foi capaz de lidar com os

80 cenários gerados, respeitando todas as restrições impostas. Devido a sua natureza construtiva e determinística, mesmo trabalhando múltiplos processamentos de um mesmo problema, os resultados são constantes a um baixo esforço computacional de tempo de processamento. Apesar de a heurística apresentar menor percentual de sequenciamento dos talhões comparada ao cenário operacional real, sua aplicação garante o cumprimento rigoroso das recomendações técnicas. O simulador SIOP foi capaz de gerar instâncias que simulam perfeitamente o problema de planejamento silvicultural, destacando sua eficácia na geração de ordens de serviço sob diferentes cenários e densidades de talhões. O simulador demonstrou um alto grau de adaptabilidade ao lidar com variabilidades espaciais e temporais, assegurando o cumprimento das restrições técnicas e operacionais impostas que o problema exige. Identificou-se três atividades mais sensíveis e que geram maiores impactos na ociosidade, sendo elas HPEL (54,03%), RM (24,16%) e 2CF (11,08%). O estudo também abre perspectivas para futuras melhorias na geração de regras do problema aplicado e a possibilidade de sua generalização a diversos outros problemas de agendamento/sequenciamento, como por exemplo, na colheita florestal.

REFERÊNCIAS

- AFRY. **Custo da atividade florestal fica bem acima da inflação e cresce 2,1% no terceiro trimestre.** 2023. Disponível em: <https://afry.com.br/noticias/custo-da-atividade-florestal-fica-bem-acima-da-inflacao-e-cresce-21-no-terceiro-trimestre>. Acesso em: 08 abr. 2025.
- BERTAGNON, A. **Improving Reasoning in Constraint Logic Programming: An Application to Route Planning and Qualitative Temporal Reasoning Problems.** 2021. Tese de Doutorado – Università di Ferrara, Itália, 2021. Acesso em: 21 oct 2024.
- CARIOU C, MOIROUX-ARVIS L, PINET F, CHANET J P. **Evolutionary Algorithm with Geometrical Heuristics for Solving the Close Enough Traveling Salesman Problem: Application to the Trajectory Planning of an Unmanned Aerial Vehicle.** *Algoritmos*. 2023; 16(1):44. <https://doi.org/10.3390/a16010044>
- CSARDI, G.; NEPUSZ, T. **igraph: Network Analysis and Visualization.** Versão 1.5.0. [S.l.]: R Project, 2006. Disponível em: <https://igraph.org>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings.** Roma: FAO, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/ca8753en>. Acesso em: 24 set. 2024.
- FAO. **Global forest sector outlook 2050: Assessing future demand and sources of timber for a sustainable economy – Background paper for The State of the World’s Forests 2022.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc2265en>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- FRAMINAN, J. M.; PÉREZ-GONZÁLEZ, P.; FERNÁNDEZ-VIAGAS, V. **Deterministic assembly scheduling problems: A review and classification of concurrent-type scheduling models and solution procedures.** *European Journal of Operational Research*, v. 273, n. 2, p. 401-417, 2019.
- FRAMINAN, J.; LEISTEN, R.; RUIZ, R. **Manufacturing scheduling systems: An integrated view of models, methods, and tools.** Springer, 2014.
- GARCIA, E. et al. **Dinâmica do êxodo rural e envelhecimento da população agrícola no Brasil: desafios para a produção sustentável.** *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 56, n. 3, p. 423–440, 2018.
- GOGNA, A.; TAYAL, A. **Metaheuristics: Review and application.** *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, United Kingdom, v. 25, n. 4, p. 503–526, 1 dez. 2013.
- HERTZ, A.; WIDMER, M. **Guidelines for the use of meta-heuristics in combinatorial optimization.** *European Journal of Operational Research*, Netherlands, v. 151, n. 2, p. 247–252, 2003.
- IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2023.** São Paulo: Ibá, 2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 24 set. 2024.

- JANIAK, A.; JANIAK, W. A.; KRYSIAK, T.; KWIATKOWSKI, T. **A survey on scheduling problems with due windows**. European Journal of Operational Research, v. 242, p. 347-357, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- JÓZEFOWSKA, J. **Just-in-Time Scheduling: Models and Algorithms for Computer and Manufacturing Systems**. Nova York: Springer Science + Business Media, 2007. (International Series in Operations Research & Management Science).
- KRAMER, F.-J.; LEE, C.-Y. **Commondue – window scheduling**. Production and Operations Management, v. 2, n. 4, p. 262-275, 1993.
- LOUMAN, B. et al. **Manual de silvicultura tropical**. Rio de Janeiro: CATIE/CIAT/FAO, 2001. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/silvicultura/livros/MANUAL%20DE%20SILVICULTURA%20TROPICAL.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2025.
- SILVA, C. S. J. **Alocação de fomentos florestais sob condições de incerteza**. 2019. 89 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- VIEIRA, E. M.; IOB, G. **Dispersão e predação de sementes de Araucaria angustifolia**. In: FONSECA, C. R. et al. (Orgs.). Floresta com Araucária: ecologia, conservação e desenvolvimento sustentável. Ribeirão Preto: Holos, 2009. p. 85–96.