

Modelo de Programação Linear Inteira para Otimização do Transporte na Colheita Florestal

Lucas Felipe Bravim Montebeller

Instituto Federal do Espírito Santo
Av. dos Sabiás, 330, Morada de Laranjeiras - Serra, ES
montebellerlucas@gmail.com

Leandro Colombi Resendo

Instituto Federal do Espírito Santo
Av. dos Sabiás, 330, Morada de Laranjeiras - Serra, ES
leandro@ifes.edu.br

RESUMO

A indústria florestal desempenha um papel vital na economia global, mas enfrenta desafios logísticos significativos, especialmente no transporte de madeira. No Brasil, o crescimento impulsionado pela Silvicultura 4.0 demanda cada vez mais métodos avançados de tomada de decisão. Diante da predominância do modal rodoviário e dos altos custos dos equipamentos de colheita florestal, este estudo propõe um modelo de **Programação Linear Inteira Mista** para minimizar o tempo de operação desta atividade e, consequentemente, reduzir os custos associados. A abordagem considera dois problemas de roteamento de veículos interconectados: um para caminhões e outro para empilhadeiras. Os resultados mostraram que o modelo lidou satisfatoriamente com os cenários testados, analisando como o investimento em veículos ou empilhadeiras adicionais impacta o valor objetivo. Além disso, uma análise de desempenho comparando com instâncias da literatura revelou que o modelo geralmente se saiu melhor.

PALAVRAS CHAVE. Colheita Florestal, Otimização, Programação Linear Inteira.

Tópicos: AG&MA – PO na Agricultura e Meio Ambiente, PM – Programação Matemática

ABSTRACT

The forestry industry plays a vital role in the global economy but faces significant logistical challenges, particularly in timber transportation. In Brazil, growth driven by Forestry 4.0 increasingly demands advanced decision-making methods. Given the predominance of road transport and the high costs of harvesting equipment, this study proposes a Mixed-Integer Linear Programming model to minimize operational time and consequently reduce associated costs. The approach considers two interconnected vehicle routing problems: one for trucks and another for forklifts. The results showed that the model handled the tested scenarios satisfactorily, analyzing how investment in additional trucks or forklifts impacts the objective value. Furthermore, a performance analysis comparing instances from the literature revealed that the model generally performed better.

KEYWORDS. Forest Harvest, Optimization, Integer Linear Programming.

Paper topics: AG&MA – OR in Agriculture and Environment, PM – Mathematical Programming

1. Introdução

A indústria florestal tem desempenhado um papel importante no desenvolvimento econômico dos países ao longo das décadas. Em 2011, estima-se que o setor tenha contribuído com mais de 1,298 trilhões de dólares para o PIB global [Li et al., 2019]. Além disso, entre 2017 e 2019, proporcionou empregos para aproximadamente 33 milhões de pessoas, equivalente a 1% de todas as atividades econômicas, conforme relatório da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) [Lippe et al., 2022]. A extração de madeira é uma atividade central nesse âmbito, devido às características intrínsecas desta matéria-prima, tais como sua adaptabilidade, resistência e maleabilidade, além de ser um recurso renovável. Entre as principais aplicações, destaca-se o uso como base para fontes de combustível, construção, papel e produtos químicos [Tsoumis, 2023]. No Brasil, somente em 2023, o setor florestal teve um aumento de 6,3%, estabelecendo também um novo recorde na produção de papel, com 11 milhões de toneladas [IBA, 2023].

O crescimento da área tem fomentado um maior investimento em recursos tecnológicos através da Silvicultura 4.0, uma extensão da revolução industrial digital no meio agrícola [Neto et al., 2020]. As inovações abrangem maquinários avançados, sistemas de geolocalização, automações hídricas, drones e *softwares* para tomada de decisões. Nesse cenário, a pesquisa operacional emergiu como uma ferramenta essencial, ganhando cada vez mais destaque na otimização dos custos associados à cadeia produtiva [Rönnqvist et al., 2023]. Essas inovações permitem uma utilização mais eficiente dos recursos naturais e financeiros, resultando em atividades mais sustentáveis e lucrativas.

O processo da colheita é composto por diferentes elementos tais como fábrica, caminhões, guas ou empilhadeiras, talhões e lotes. **As guas e empilhadeiras se distinguem pela capacidade de levantamento de carga, sendo que as empilhadeiras, embora suportem menos peso, são mais utilizadas no carregamento dos veículos devido à sua mobilidade.** Os talhões são o resultado do processo de talhamento, que consiste na subdivisão de uma área destinada ao plantio em subáreas menores [Machado et al., 2009]. Essa prática é amplamente adotada na silvicultura devido às vantagens operacionais que oferece e à facilidade no manejo florestal [Castro, 2018]. **Os talhões funcionam como grandes depósitos a céu aberto, permitindo o armazenamento e a organização das árvores colhidas.** Os lotes são definidos como parcelas de madeira de menor volume originada de cada talhão. **A extração envolve a retirada destas pilhas para uma área de carregamento, onde os veículos de transporte serão abastecidos. As empilhadeiras são responsáveis por acomodar os lotes de madeira nos caminhões, que obedecem uma ordem de atendimento programada. Uma vez carregados, transportam o material até a indústria, repetindo o processo diversas vezes.**

A logística do transporte frequentemente representa o maior custo entre todas as etapas da colheita, podendo ultrapassar mais da metade do custo operacional total [Machado et al., 2009]. Dessa maneira, torna-se imprescindível um planejamento eficiente levando em conta as principais variáveis do problema. Sabendo que no Brasil, o modal rodoviário é o principal escolhido para transporte de cargas com 61,1% [CNT, 2019], a aplicação de modelos de otimização ao roteamento se tornou fundamental para otimizar os gastos logísticos. Geralmente, esses métodos de decisão levam em consideração fatores como a distância entre o ponto de partida e o destino, capacidade e autonomia dos veículos, restrições de tempo e outras particularidades do problema em questão. Além do roteamento eficiente, é fundamental considerar a melhor configuração possível das empilhadeiras. Isso se deve ao elevado custo desses equipamentos, como o *forwarder*, que gera um gasto médio de \$147,80/hora [Santos et al., 2016]. Além disso, a disponibilidade dessas empilhadeiras é limitada em comparação com a frota de caminhões, tornando crucial a sua gestão eficiente.

Nesse contexto, este trabalho propõe um novo modelo de Programação Linear Inteira Mista para otimizar o sequenciamento dos caminhões e das empilhadeiras na colheita florestal.

Diferente dos trabalhos encontrados na literatura, nessa proposta o problema descrito foi modelado como um **problema de roteamento de veículos com múltiplas viagens** (caminhões) **interligado a um problema clássico de roteamento de veículos** (empilhadeiras). Nos resultados numéricos avaliamos as características computacionais das instâncias, bem como características das soluções considerado diferentes cenários. Adicionalmente, usando instâncias de tamanho real, comparamos os resultados obtidos pelo modelo com outro trabalho encontrado na literatura.

A continuação deste artigo segue uma estrutura organizada da seguinte forma: na Seção 2 é apresentado um referencial teórico relacionado a essa proposta; na Seção 3 será oferecida uma descrição detalhada do problema, destacando seus elementos essenciais e os desafios enfrentados; na Seção 4 está apresentado o modelo proposto para problema; na Seção 5 são exibidos os experimentos realizados e resultados obtidos; por fim, Seção 6 traz as conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Classicamente, o problema de roteamento de veículos (*Vehicle Routing Problem* - VRP) envolve encontrar as melhores rotas para uma frota atender um conjunto de clientes, retornando ao depósito de origem, com cada cliente visitado uma única vez [Golden et al., 2008]. Variações comuns foram desenvolvidas ao longo dos anos, incluindo a capacidade dos veículos (*Capacitated VRP* - CVRP), janelas de tempo (*VRP With Time Window* - VRPTW), frota heterogênea (*Heterogeneous Fleets VRP* - HFVRP), múltiplos depósitos (*Multi-depot VRP* - MDVRP), além da combinação destas [Tan e Yeh, 2021].

Uma outra variante é o VRP com múltiplas viagens (*Multi-trip VRP* - MTVRP), onde os veículos podem realizar várias jornadas dentro de um intervalo de tempo estabelecido [Mor e Speranza, 2020]. O objetivo principal é minimizar o tempo total de serviço. Essa abordagem tem se destacado, especialmente na resolução de entregas na última milha, onde há a necessidade de descarregar e, em seguida, fazer viagens adicionais para atender mais clientes.

Na área florestal, o VRP aplicado ao transporte de madeira (*Timber Transportation VRP* - TTVRP) é amplamente utilizado em diversos contextos industriais, sustentáveis e econômicos, cobrindo diferentes horizontes de planejamento [Audy et al., 2023]. Quanto aos métodos de solução, destacam-se Programação Linear (*Linear Programming* - LP), Heurísticas e Programação Dinâmica.

Em [Meneguzzi et al., 2020], os autores utilizaram uma adaptação do modelo Programação Linear Inteira clássico do VRPTW para otimizar o planejamento anual de inventário em florestas de eucalipto. A principal ideia foi minimizar a distância percorrida pelas equipes de análise até os talhões, garantindo que cada medição seja feita no período planejado e respeitando as limitações de recursos humanos.

No trabalho de [Rönnqvist et al., 2015] foi elencado os principais problemas de decisão em aberto na área florestal. Entre os desafios, destaca-se a modelagem matemática da sincronização entre caminhões e pás carregadeiras, que se trata do foco desse trabalho.

No contexto específico deste tema, os únicos trabalhos encontrados na literatura que abordam o sequenciamento das empilhadeiras com o roteamento de veículos de forma simultânea foram [Ussi Monti et al., 2020] e [Mutz et al., 2023], que inspiraram este trabalho.

Em [Ussi Monti et al., 2020], os autores propõem uma otimização multiobjetivo do transporte de madeira utilizando Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP). O modelo tem como objetivo minimizar vários componentes de custo, como a quantidade de caminhões, as respectivas rotas, e o valor das horas extras pagas aos motoristas. O trabalho adota uma perspectiva considerando a possibilidade de rotas duplas para maximizar a eficiência do carregamento dos veículos. Ainda assim, o foco do estudo está nos custos monetários associados às operações de transporte e não necessariamente no tempo de execução das atividades. Além disso, o horizonte de planejamento das atividades é semanal, de forma que a alocação das guas é realizada

diariamente em cada talhão. Como isso apresenta um modelo de otimização totalmente diferente da modelagem proposta aqui.

Em [Mutz et al., 2023], é proposto uma abordagem heurística para o problema, utilizando Algoritmos Genéticos (GA) e o Algoritmo do Vaga-lume (FA), além de uma combinação híbrida dos dois. Uma análise detalhada foi conduzida em um conjunto de 30 instâncias. Os resultados mostraram que o Algoritmo Genético apresentou o melhor desempenho, bem como um menor tempo de processamento. No entanto, o método adotado não foi avaliado com uma solução ótima. Dessa forma, este estudo propõe uma alternativa complementar ao explorar um modelo exato de solução, servindo também como referência para futuros *benchmarks* e calibrações de heurísticas.

A estratégia de busca de uma solução ótima é reforçada pelo trabalho de [Belavenutti et al., 2018], que oferece uma análise abrangente, examinando 67 artigos e os modelos empregados na gestão de plantações florestais industriais. No estudo, destaca-se a predominância de métodos de LP e MILP.

3. Descrição do Problema

O problema consiste em rotear veículos para serem carregados por um único lote de madeira em um dos talhões, seguindo uma sequência de atendimento definida pelas empilhadeiras. Após o carregamento, os caminhões retornam à fábrica para descarregar os lotes e são realocados para outros talhões, repetindo esse ciclo até que todos os lotes tenham sido transportados. Simultaneamente, cada empilhadeira opera em um talhão específico e, após completar suas tarefas, devem ser transferida para outro talhão. Como, em geral, existem menos empilhadeiras do que talhões, a logística deve garantir que os caminhões só serão enviados para onde há alguma empilhadeira.

Essa dinâmica de operação pode ser interpretada como a interação de dois VRPs interconectados. No caso dos veículos, trata-se de um MTVRP, no qual os veículos são roteados para atender aos talhões em múltiplas viagens, sem limite de jornada de serviço. Por outro lado, para as empilhadeiras, o desafio é semelhante ao de um VRP clássico, envolvendo o roteamento delas nos talhões para otimizar o carregamento. A interconexão desses dois sistemas é crucial para garantir uma operação logística eficiente e sincronizada.

A Figura 1 ilustra um cenário com duas empilhadeiras, três talhões com diferentes quantidades de lotes em cada um, e dois caminhões. O exemplo demonstra uma solução ótima onde o primeiro veículo atende em sequência os lotes 5, 2 e 1, enquanto o segundo atende os lotes 4, 3 e 6. Podemos observar que ambos os veículos partem inicialmente da fábrica para o talhão 2 e, como só temos uma empilhadeira trabalhando por talhão, um dos caminhões ficaria aguardando o carregamento do outro. Como o tempo de carregamento é constante para todos os talhões, a escolha ideal foi que o caminhão 1 esperasse. Quanto às empilhadeiras, a empilhadeira 2 atende apenas o talhão 1, enquanto a empilhadeira 1 é responsável pelo talhão 2 e, em seguida, pelo talhão 3. Embora possa parecer que a empilhadeira 2 deveria se deslocar para o talhão 3 por ter menos lotes a atender no talhão 1, o tempo de locomoção justifica essa decisão. Como pode ser visto na matriz de custo da imagem, o tempo de deslocamento entre os talhões 1 e 3 é maior do que entre os talhões 2 e 3. Portanto, a alocação da empilhadeira 1 para se mover do talhão 2 para o talhão 3 resulta em uma solução mais eficiente. Na figura, também são apresentadas algumas variáveis de decisão do modelo proposto. Na próxima seção esses elementos serão melhor explicados.

4. Modelo Proposto

Nessa seção apresentamos o modelo de PLIM proposto nesse trabalho para realizar o roteamento dos veículos integrado ao sequenciamento das empilhadeiras. A abordagem tem como objetivo minimizar o tempo total necessário para concluir o atendimento de todos os lotes. A Tabela 1 define as notações utilizadas no modelo, incluindo os conjuntos e variáveis de decisão.

Figura 1: Exemplo de sequenciamento otimizado.

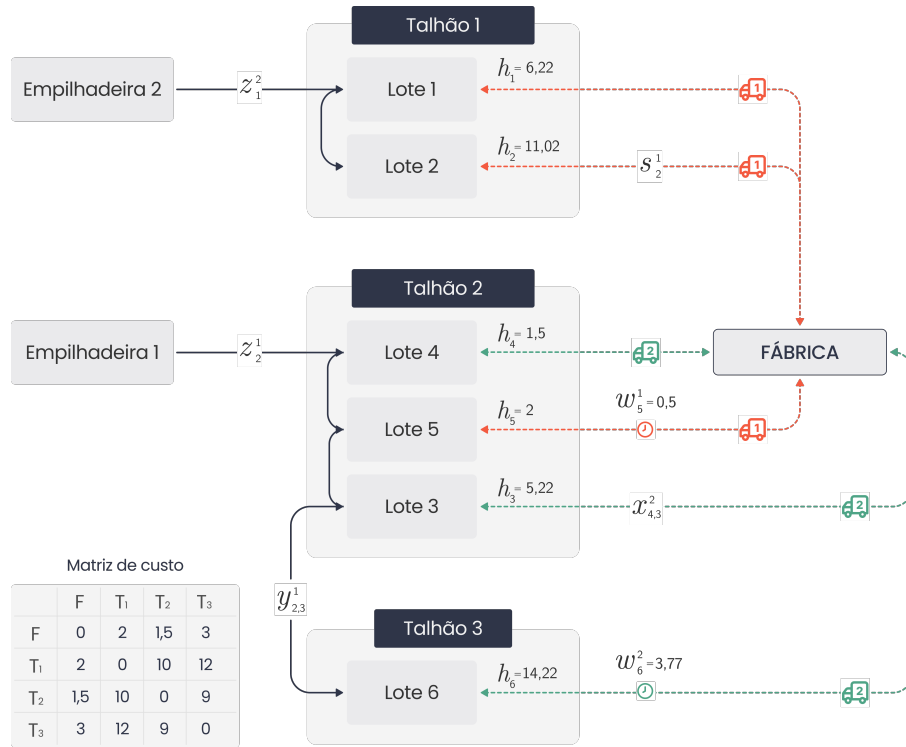


Tabela 1: Estrutura do modelo proposto.

	Notações	Descrição
Conjuntos	L	Conjunto total de lotes, onde $i, j \in L = \{1, \dots, L \}$
	V	Conjunto total de veículos, onde $k \in V = \{1, \dots, K \}$
	T	Conjunto de talhões, onde $a, b \in T = \{1, \dots, T \}$
	E	Conjunto de empilhadeiras, onde $e \in E = \{1, \dots, E \}$
	$LT[a]$	Total de lotes no talhão a
	$LE[i, a]$	Matriz binária que identifica se o lote i pertence ao talhão a , com $a \in \{0, \dots, T + 1\}$
	$T_{ida}[i]$	Tempo de ida da fábrica ao lote i
	$T_{volta}[i]$	Tempo de volta do lote i até a fábrica
Variáveis de Decisão	$DE[a, b]$	Matriz que representa o tempo de deslocamento entre os talhões a e b
	$x_{i,j}^k$	Variável binária, indica se o veículo k atende o lote j logo após i
	s_i^k	Variável binária, indica se o veículo k atende o lote i
	b_i^k	Instante em que o veículo k chega no lote i
	d_i^k	Instante que o veículo k começa a ser carregado com o lote i
	w_i^k	Tempo de espera do veículo k no talhão para ser carregado com o lote i
	h_i	Instante que o lote i foi atendido
	$y_{a,b}^e$	Variável binária, indica se a empilhadeira e atende o talhão b logo após a
	z_a^e	Variável binária, indica se a empilhadeira e atende o talhão a
	c_a^e	Instante em que a empilhadeira e começa a atender o talhão a
	m	Instante de início de atendimento do último lote, em horas

Função Objetivo: A estratégia utilizada no modelo foi minimizar o *makespan*, reduzindo o instante de início de atendimento do último lote. A Expressão 1 formaliza esta abordagem.

$$\text{Minimizar } m \quad (1)$$

Restrições:

A Expressão 2 garante que o último lote só poderá ser atendido após todos os anteriores.

$$h_i \leq m; \quad \forall i \in L \quad (2)$$

A Expressão 3 indica que cada lote deve ser atendido por exatamente um veículo.

$$\sum_{k \in V} s_i^k = 1; \quad \forall i \in L \quad (3)$$

A Expressão 4 assegura que se o veículo k não atende o lote i , não pode atender nenhum outro lote imediatamente antes ou após.

$$\text{Se } (s_i^k = 0), \text{ então } (x_{i,j}^k = 0) \text{ e } (x_{j,i}^k = 0); \\ \forall (k \in V, i \in L, j \in L : i \neq j) \quad (4)$$

A Expressão 5 assegura que se o veículo k atende o lote i , deve obrigatoriamente atender algum outro lote imediatamente antes ou após, mesmo que virtual (representado a garagem).

$$\text{Se } (s_i^k = 1), \text{ então } \left(\sum_{\substack{j \in 1..|L|+1 \\ i \neq j}} x_{i,j}^k = 1 \right) \text{ ou } \left(\sum_{\substack{j \in 0..|L| \\ i \neq j}} x_{j,i}^k = 1 \right); \\ \forall (k \in V, i \in L) \quad (5)$$

A Expressão 6 garante que o número de transições realizadas por um veículo é exatamente uma unidade menor do que o número total de lotes atendidos por esse veículo. Essa restrição é necessária para evitar a formação de sub-rotas no problema.

$$\sum_{\substack{i,j \in L \\ i \neq j}} x_{i,j}^k = \left(\sum_{i \in L} s_i^k \right) - 1; \quad \forall k \in V \quad (6)$$

A Expressão 7 certifica que todos os veículos irão sair da fábrica.

$$\sum_{j \in 1..|L|+1} x_{0,j}^k = 1; \quad \forall k \in V \quad (7)$$

A Expressão 8 certifica que todos os veículos retornem a fábrica.

$$\sum_{i \in 0..|L|} x_{i,|L|+1}^k = 1; \quad \forall k \in V \quad (8)$$

A Expressão 9 garante que a quantidade de veículos que sai de um determinado lote é igual à quantidade que chega no próximo a ser atendido (continuidade de fluxo).

$$\sum_{j \in 0..|L|} x_{j,i}^k - \sum_{j \in 1..|L|+1} x_{i,j}^k = 0; \quad \forall (k \in V, i \in L) \quad (9)$$

A Expressão 10 assegura que para o primeiro lote i atendido por k , o tempo de início de atendimento é igual ao tempo de deslocamento da fábrica ao lote.

$$\text{Se } (x_{0,i}^k = 1), \text{ então } (b_i^k = T_{ida}[i]); \quad \forall (k \in V, i \in L) \quad (10)$$

A Expressão 11 garante que, se o veículo k atende o lote j imediatamente após o lote i , o instante de chegada de k em j deve ser maior ou igual o instante de chegada de k em i , mais a espera de k por i , mais o tempo de carregamento (TC) de i , mais o tempo de volta de i até a fábrica e mais o tempo de ida da fábrica até o lote j .

$$\text{Se } (x_{i,j}^k = 1), \text{ então } (b_j^k \geq b_i^k + w_i^k + TC + T_{volta}[i] + T_{ida}[j]); \\ \forall (k \in V, i \in L, j \in L : i \neq j) \quad (11)$$

A Expressão 12 garante que tempo de início de atendimento do lote i é o tempo em que o veículo k chegou neste lote acrescido do tempo de espera no mesmo.

$$d_i^k = b_i^k + w_i^k; \quad \forall (k \in V, i \in L) \quad (12)$$

A Expressão 13 diz que se o veículo k não atende o lote i , o tempo de início de atendimento deve ser zero.

$$\text{Se } (s_i^k = 0), \text{ então } (d_i^k = 0); \quad \forall (k \in V, i \in L) \quad (13)$$

A Expressão 14 diz que se o veículo k atende o lote i , tempo de início de atendimento é exatamente o instante em que i foi atendido.

$$\text{Se } (s_i^k = 1), \text{ então } (d_i^k = h_i); \quad \forall (k \in V, i \in L) \quad (14)$$

A Expressão 15 garante que se dois lotes pertencem ao mesmo talhão e são atendidos pela mesma empilhadeira, então a diferença do instante de carregamento entre eles deve ser maior que o tempo de carregamento.

$$(h_i \geq h_j + TC) \text{ ou } (h_i \leq h_j - TC); \\ \forall (i \in L, j \in L, a \in T : i \neq j \text{ e } LE[a, i] = 1 \text{ e } LE[a, j] = 1) \quad (15)$$

A Expressão 16 é análoga à Expressão 3, onde cada talhão deve ser atendido por apenas uma empilhadeira.

$$\sum_{e \in E} z_a^e = 1; \quad \forall a \in T \quad (16)$$

A Restrição 17 é análoga à Restrição 4, mas para empilhadeiras e talhões.

$$\text{Se } (z_a^e = 0), \text{ então } (y_{a,b}^e = 0) \text{ e } (y_{b,a}^e = 0); \\ \forall (e \in E, a \in T, b \in T : a \neq b) \quad (17)$$

A Restrição 18 é análoga à Restrição 5, mas para empilhadeiras e talhões.

$$\text{Se } (z_a^e = 1), \text{ então } \left(\sum_{\substack{b \in 1..|T|+1 \\ a \neq b}} y_{a,b}^e = 1 \right) \text{ ou } \left(\sum_{\substack{b \in 0..|T| \\ a \neq b}} y_{b,a}^e = 1 \right);$$

$$\forall (e \in E, a \in T) \quad (18)$$

A Restrição 19 é análoga à Restrição 7, mas para empilhadeiras e talhões.

$$\sum_{b \in 1..|T|+1} y_{0,b}^e = 1; \quad \forall e \in E \quad (19)$$

A Restrição 20 é análoga à Restrição 8, mas para empilhadeiras e talhões.

$$\sum_{a \in 0..|T|} y_{a,|T|+1}^e = 1; \quad \forall e \in E \quad (20)$$

A Restrição 21 é análoga à Restrição 9, mas para empilhadeiras e talhões.

$$\sum_{b \in 0..|T|} y_{b,a}^e - \sum_{b \in 1..|T|+1} y_{a,b}^e = 0; \quad \forall (e \in E, a \in T) \quad (21)$$

A Restrição 22 é semelhante à Restrição 11, mas para empilhadeiras e talhões e com uma alteração importante. Aqui, o tempo de carregamento é multiplicado pela quantidade de lotes presentes no talhão atual a , refletindo o fato de que uma empilhadeira só pode iniciar o atendimento a outro talhão após concluir o carregamento de todos os lotes no talhão atual. Além disso, não existe tempo de espera e o deslocamento entre talhões é direto, ou seja, de uma localização a para outra localização b .

$$\text{Se } (y_{a,b}^e = 1), \text{ então } (c_b^e \geq c_a^e + (TC * LT[a]) + DE[a, b]);$$

$$\forall (e \in E, a \in T, b \in T : a \neq b) \quad (22)$$

A Restrição 23 é análoga à Restrição 13, mas para empilhadeiras e talhões.

$$\text{Se } (z_a^e = 0), \text{ então } (c_a^e = 0); \quad \forall (e \in E, a \in T) \quad (23)$$

A Expressão 24 é a restrição que relaciona os dois problemas. Se a empilhadeira e atende o talhão b imediatamente após a , então o momento em que o lote i é atendido em a deve estar dentro do intervalo entre o início do atendimento em a e o início do atendimento em b , menos o tempo de deslocamento entre os locais (talhões) a e b .

$$\text{Se } (y_{a,b}^e = 1), \text{ então } (h_i \geq c_a^e) \text{ e } (h_i \leq c_b^e + DE[a, b]);$$

$$\forall (e \in E, a \in 0..|T| + 1, b \in 0..|T| + 1, i \in L : a \neq b \text{ e } LE[a, i] = 1) \quad (24)$$

5. Resultados

Os experimentos conduzidos neste estudo foram realizados em um computador equipado com um processador AMD Ryzen 7 5800X (8 núcleos, 3.8 GHz), 32 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11. A implementação e execução das instâncias foi realizada utilizando o IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 20.10.

As investigações foram divididas em duas etapas. Na primeira, o foco foi na avaliação do modelo em instâncias menores, visando a obtenção do valor ótimo. Na segunda parte, algumas das instâncias apresentadas por [Mutz et al., 2023] foram utilizadas para comparação de resultados. Em todos os cenários, o tempo de processamento foi limitado em uma hora.

5.1. Avaliação do Modelo

A Tabela 2 apresenta as sete características básicas (configuração das instâncias) utilizadas como base nesta fase dos experimentos. Para exemplificar, as instâncias que utilizarem a configuração (A) terão 2 veículos ($|V|$), um tempo de carregamento (TC) de 1 hora, 2 talhões ($|T|$) e 1 empilhadeira ($|E|$). As demais configurações são ajustadas para testar diferentes aspectos do modelo. As configurações B e C alteram a quantidade de veículos e o tempo de carregamento, respectivamente. Já as configurações D a G consideram 3 talhões, diferenciando-se pelo número de veículos e empilhadeiras.

Tabela 2: Configurações de experimento variando parâmetros de entrada.

Configuração	$ V $	TC	$ T $	$ E $
A	2	1,0	2	1
B	3	1,0	2	1
C	2	0,5	2	1
D	2	1,0	3	1
E	3	1,0	3	1
F	2	1,0	3	2
G	3	1,0	3	2

A Tabela 3 mostra características adicionais das instâncias, como o número de lotes e a distribuições dos lotes nos talhões (LT), bem como os resultados das execuções, incluindo o valor da função objetivo, tempo de processamento e o gap retornado pelo software, quando aplicável. Ao todo, são descritos 21 experimentos, nos quais cada teste é caracterizado por uma combinação do número de lotes com as configurações especificadas na Tabela 2. Afim de aproximar o cenário testado à realidade, foram utilizados alguns dados de [Vieira, 2018] como referência para gerar a matriz de tempo entre os talhões e a fábrica. Adicionalmente, devido à característica do deslocamento, foi adicionado 30% no tempo de deslocamento das empilhadeiras e 15% nos veículos carregados.

Uma análise preliminar indica que o tempo de processamento cresce exponencialmente com o aumento do número de lotes, um padrão típico para esse tipo de problema. Além disso, ficou evidente em todos os casos que, adicionar um veículo (configuração B) mostrou-se mais vantajoso do que duplicar a eficiência de uma empilhadeira (configuração C). Curiosamente, o aumento do número de veículos por vezes também reduziu o tempo de processamento (experimentos 8.2, 8.7 e 10.7), assim como o gap (experimentos 12.2, 12.5 e 12.7).

De forma geral, observou-se que a redistribuição dos lotes com a adição de um talhão melhorou o valor objetivo (experimentos 8.4, 10.4, 12.4). Ademais, ao comparar o acréscimo de um veículo entre as configurações (D, E) e (F, G) com o incremento de uma empilhadeira em (D, F) e (E, G), nota-se que investir em uma empilhadeira adicional é mais eficaz do que adquirir um novo veículo. Essa escolha pode reduzir o tempo da operação em até aproximadamente 36% (experimentos 10.5 e 10.7).

Tabela 3: Instâncias testadas para 8, 10 e 12 lotes, variando diferentes configurações do modelo.

	Experimento	Configuração	LT	Função objetivo (h)	Processamento (s)	GAP
8 lotes	8.1	A	[3, 5]	15,24	4,30	
	8.2	B	[3, 5]	11,41	3,44	
	8.3	C	[3, 5]	13,74	4,72	
	8.4	D	[3, 3, 2]	13,22	1,02	
	8.5	E	[3, 3, 2]	10,39	1,03	
	8.6	F	[3, 3, 2]	9,78	29,25	
	8.7	G	[3, 3, 2]	6,68	2,09	
10 lotes	10.1	A	[4, 6]	17,24	479,10	
	10.2	B	[4, 6]	13,41	507,82	
	10.3	C	[4, 6]	14,74	193,06	
	10.4	D	[4, 3, 3]	15,22	15,73	
	10.5	E	[4, 3, 3]	12,39	75,60	
	10.6	F	[4, 3, 3]	11,94	1916,31	
	10.7	G	[4, 3, 3]	7,92	354,59	
12 lotes	12.1	A	[5, 7]	22,29	3600	60,06%
	12.2	B	[5, 7]	16,78	3600	50,96%
	12.3	C	[5, 7]	19,79	3600	69,06%
	12.4	D	[5, 4, 3]	17,90	3600	83,21%
	12.5	E	[5, 4, 3]	15,77	2829,80	
	12.6	F	[5, 4, 3]	15,41	3600	62,22%
	12.7	G	[5, 4, 3]	10,26	3600	32,60%

Quanto à escalabilidade do modelo, observa-se que até 10 lotes foi possível obter uma solução ótima com um tempo de processamento máximo de aproximadamente 32 minutos (experimento 10.6). Já para 12 lotes, a única solução exata obtida foi para o experimento 12.5. Vale ressaltar que o desvio padrão dos gaps foi de aproximadamente 27,41%, o que evidencia a sensibilidade do modelo às diferentes combinações.

5.2. Avaliação de Desempenho

A Tabela 4 apresenta as características de cinco instâncias extraídas de [Mutz et al., 2023]. Em todos os casos, o número de talhões é igual a 4. Pode-se observar que as instâncias são maiores que as avaliadas anteriormente, com os grupos G1, G2, G3 e G5 sendo constituídos de 22 lotes, enquanto o grupo G4 possui 28 lotes. Os números de caminhões e empilhadeiras variam entre os grupos, refletindo diferentes níveis de complexidade e recursos disponíveis.

A Figura 2 apresenta um gráfico comparativo dos resultados obtidos pelo modelo desenvolvido com a melhor heurística (GA) mencionada na referência. Os respectivos *gaps* encontrados foram de 98,05%, 93,16%, 93,82%, 97,70% e 97,77%. Apesar disso, observa-se que os resultados obtidos pelo modelo superam os da referência nos grupos G1 a G4 e igualam no grupo G5, demonstrando a eficácia da abordagem proposta.

Tabela 4: Características das instâncias comparadas.

Grupo	Instância	Caminhões	Empilhadeiras	LT
G1	1	4	2	[7, 4, 5, 6]
G2	8	8	3	[7, 4, 5, 6]
G3	14	10	4	[7, 4, 5, 6]
G4	16	8	3	[7, 7, 7, 7]
G5	20	9	3	[7, 4, 5, 6]

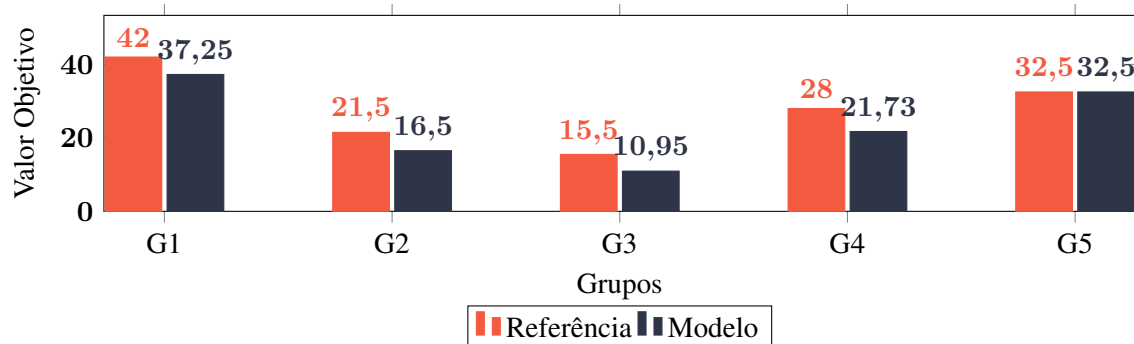


Figura 2: Comparação dos Valores Objetivos: Referência vs. Modelo

6. Conclusão

Este trabalho investiga a otimização do problema da logística da colheita florestal, analisando a interação entre o roteamento dos veículos e o sequenciamento das empilhadeiras. Por meio de um modelo exato de solução, foi possível avaliar diversas configurações e cenários, com o propósito de fornecer suporte na tomada de decisões para as indústrias deste setor.

Nos experimentos, foi possível identificar estratégias que podem otimizar significativamente o tempo de operação. Foi visto que a distribuição dos lotes nos talhões impacta diretamente na decisão do modelo. Da mesma forma, o incremento de empilhadeiras se mostrou mais eficaz que o de veículos. Esses *insights* podem direcionar profissionais do setor, permitindo que eles tomem decisões mais informadas e estratégicas em suas operações diárias. Além disso, este estudo possibilitou uma comparação direta com um trabalho de referência na área. Verificamos que, apesar de não alcançarmos uma solução ótima dentro do limite de uma hora de processamento, os resultados obtidos geralmente superaram os apresentados na referência. Isso ressalta a eficácia e a robustez do modelo proposto, mesmo diante de cenários reais e limitações de tempo. Dependendo do horizonte de planejamento e da precisão necessária, o modelo poderia ser testado em instâncias maiores, possibilitando uma análise mais abrangente e detalhada.

Em trabalhos futuros, pretende-se explorar os relaxamentos do modelo, buscando soluções aproximadas mais eficientes em termos de tempo de processamento. Adicionalmente, considera-se conduzir estudos mais detalhados sobre a sensibilidade do modelo em relação à variedade de parâmetros, visando refiná-lo e estender sua aplicabilidade em contextos variados.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio da FAPES e CAPES (processo 2021-2S6CD, nº FAPES 132/2021) por meio do PDPG (Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação, Parcerias Estratégicas nos Estados).

Referências

- Audy, J.-F., Rönnqvist, M., D'Amours, S., e Yahiaoui, A.-E. (2023). Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. *International Journal of Forest Engineering*, 34:143–167.
- Belavenutti, P., Romero, C., e Diaz-Balteiro, L. (2018). A critical survey of optimization methods in industrial forest plantations. *Scientia Agricola*, 75:239–245.
- Castro, N. L. M. d. (2018). *Inovações na otimização do talhamento e microplanejamento da extração florestal*. PhD thesis, Universidade Federal de Viçosa.

- CNT (2019). Transporte em números. <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/39b6d11e-7996-4c2b-8894-6cf4e927f1cc.pdf>. Acessado: 2023-07-03.
- Golden, B., Raghavan, S., e Wasil, E., editors (2008). *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Springer, New York, NY.
- IBA (2023). Relatório anual iba 2023. <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acessado: 2023-03-30.
- Li, Y., Mei, B., e Linhares-Juvenal, T. (2019). The economic contribution of the world's forest sector. *Forest Policy and Economics*, 100:236–253.
- Lippe, R. S., Schweinle, J., Cui, S., Gurbuzer, Y., Katajamäki, W., Villarreal-Fuentes, M., e Walter, S. (2022). Contribution of the forest sector to total employment in national economies - estimating the number of people employed in the forest sector. <https://www.fao.org/3/cb4434en/CB4434EN.pdf>. Acessado: 2024-01-12.
- Machado, C. C., Lopes, E. d. S., e Birro, M. H. B. (2009). *Transporte Rodoviário Florestal*. Editora da Universidade Federal de Viçosa.
- Meneguzzi, C., Fernandes da Silva, G., Mauri, G., Mendonça, A., e Barros Junior, A. (2020). Routing model applied to forest inventory vehicles planning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175.
- Mor, A. e Speranza, M. (2020). Vehicle routing problems over time: a survey. *4OR*, 18.
- Mutz, A. P. M. G., Resendo, L., e Mutz, F. W. (2023). Heurísticas para otimização de um problema de transporte interconectado a um problema agendamento de tarefas: Estudo de caso da colheita florestal. *Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 55.
- Neto, E., Siqueira Walter, L., Berti, A., Brasil, I., Martins, V., Lins, T., Santana, G., Ternes, G., Araujo, E., Moura, M., Corte, A., e Sanquetta, C. (2020). *SILVICULTURA 4.0*.
- Rönnqvist, M., D'Amours, S., Weintraub, A., Jofre, A., Gunn, E., Haight, R. G., Martell, D., Murray, A. T., e Romero, C. (2015). Operations research challenges in forestry: 33 open problems. *Annals of Operations Research*, 232:11–40.
- Rönnqvist, M., Martell, D., e Weintraub, A. (2023). Fifty years of operational research in forestry. *International Transactions in Operational Research*, 30:3296–3328.
- Santos, L., Fernandes, H., Silva, M., Teixeira, M., e Souza, A. (2016). Avaliação de custos da operação de extração da madeira com forwarder. *CERNE*, 22:27–34.
- Tan, S.-Y. e Yeh, W.-C. (2021). The vehicle routing problem: State-of-the-art classification and review. *Applied Sciences*, 11:21.
- Tsoumis, G. T. (2023). Wood. <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue>. Acessado: 2023-11-10.
- Ussi Monti, C., Gomide, L., Oliveira, R., e França, L. (2020). Optimization of wood supply: The forestry routing optimization model. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 92.
- Vieira, G. C. (2018). *Modelagem matemática do transporte de máquinas em florestas de produção*. PhD thesis, Universidade Federal do Espírito Santo.