

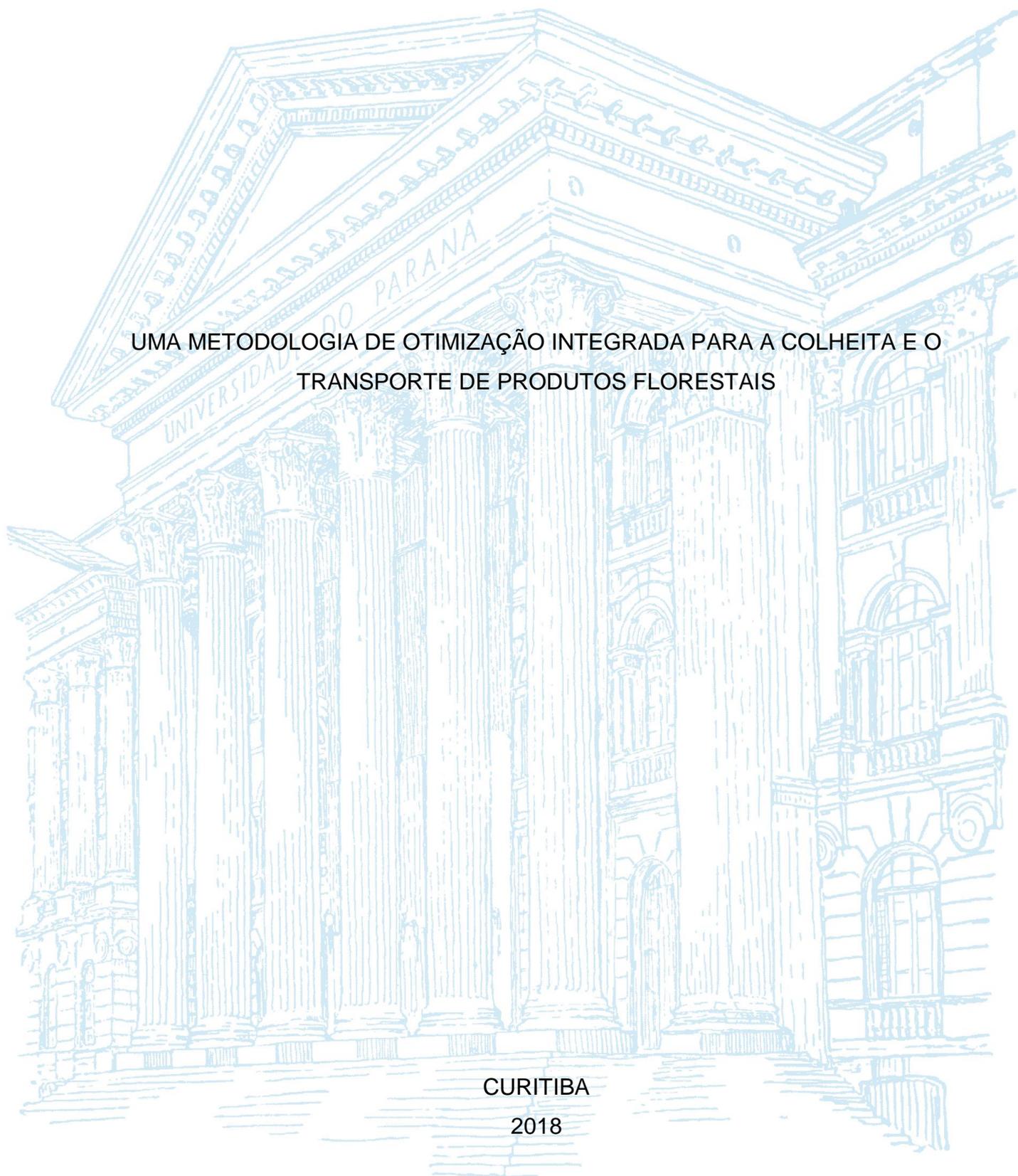
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULO AMARO VELLOSO HENRIQUES DOS SANTOS

UMA METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO INTEGRADA PARA A COLHEITA E O
TRANSPORTE DE PRODUTOS FLORESTAIS

CURITIBA

2018



PAULO AMARO VELLOSO HENRIQUES DOS SANTOS

UMA METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO INTEGRADA PARA A COLHEITA E O
TRANSPORTE DE PRODUTOS FLORESTAIS

Tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Área de Concentração em Programação Matemática, Setores de Tecnologia e Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Arinei Carlos Lindbeck da Silva.

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

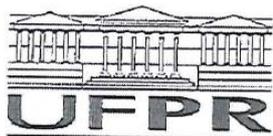
S237m Santos, Paulo Amaro Velloso Henriques dos
Uma metodologia de otimização integrada para a colheita e o transporte de produtos florestais /
Paulo Amaro Velloso Henriques dos Santos. – Curitiba, 2018.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia e Ciências Exatas,
Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Arinei Carlos Lindbeck da Silva.

1. Planejamento florestal. 2. Colheita florestal. 3. Transporte de produtos florestais.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Silva, Arinei Carlos Lindbeck da. III. Título.

CDD: 658.7882



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR CIÊNCIAS EXATAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MÉTODOS NUMÉRICOS
EM ENGENHARIA

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de PAULO AMARO VELLOSO HENRIQUES DOS SANTOS intitulada: UMA METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO INTEGRADA PARA A COLHEITA E O TRANSPORTE DE PRODUTOS FLORESTAIS, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua A PROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 30 de Maio de 2018.

Por visto conferência

ARINEI CARLOS LINDBECK DA SILVA
Presidente da Banca Examinadora

Gustavo Valentim Loch
GUSTAVO VALENTIM LOCH
Avaliador Interno

Julio Eduardo Arce
JULIO EDUARDO ARCE
Avaliador Externo

Cassius Tadeu Scarpin
CASSIUS TADEU SCARPIN
Avaliador Interno

Por visto conferência
LUCAS REZENDE GOMIDE
Avaliador Externo

Elaine, Laura e Lorena, vocês me deram a motivação necessária e dividiram comigo as dificuldades destes últimos anos de estudos e viagens. Dedico esta tese a vocês!

Elaine, meu amor, obrigado por suportar todas as provações ao meu lado. Minhas filhas, lembrem-se que todo esforço em estudar será um dia recompensado. Papai ama vocês!

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, pela sabedoria e pelo cuidado durante todos estes anos de estudos e viagens.

À minha esposa, Elaine, que esteve ao meu lado em todos os momentos difíceis e me deu forças quando eu pensava que não aguentava mais. Às minhas filhas Laura e Lorena, minha maior inspiração para continuar sempre.

Ao meu pai, por me acompanhar e me apoiar nos eventos, além das caronas de sempre. A minha mãe, por me acolher durante os estudos e por me ajudar nas correções necessárias da tese e dos artigos.

Aos meus irmãos, por sempre orarem por mim e me fazerem rir mesmo nos dias mais difíceis.

Ao meu orientador e amigo, Arinei, por me ajudar sempre que estava por perto e também quando estava longe. Muitos dos resultados aqui escritos são frutos de algumas das nossas conversas de 5 minutos!

Ao professor Julio Arce, por me apresentar a área florestal e suas características. Espero que possamos trabalhar juntos em breve em novos desafios.

Ao GTA0 e aos colegas de pesquisa, pela troca de experiências e por disponibilizar a estrutura para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao IFSC, pelos anos de incentivo à capacitação, concedendo-me o afastamento integral de minhas atividades letivas para poder realizar este doutorado.

Aos meus amigos, Maria e Thiago, pelas incontáveis correções de artigos que me ajudaram a poder submeter e publicar alguns dos resultados desta tese.

À todos os amigos que oraram por mim neste período.

Muito obrigado!

Lembre da minha ordem:
“Seja forte e corajoso! Não fique
desanimado, nem tenha medo,
porque eu, o Senhor, se Deus,
estarei com você em qualquer
lugar para onde você for”!

Josué 1:9 (NTLH)

RESUMO

Desde a década de 1960, visando otimizar o planejamento florestal, trabalhos científicos foram desenvolvidos a partir do emprego de técnicas de Pesquisa Operacional. Nas décadas de 80 e 90, os trabalhos foram divididos em níveis hierárquicos de planejamento e apresentaram a aplicação de diversas técnicas de Pesquisa Operacional, como Programação Linear, Heurísticas e Metaheurísticas. Esta tese apresentará uma perspectiva sobre o nível operacional do planejamento florestal, além de uma ampla revisão sobre os trabalhos que envolveram aplicações da Pesquisa Operacional em todo o planejamento florestal. O objetivo desta tese é apresentar uma metodologia de otimização que integre dois problemas importantes do planejamento florestal em nível operacional, agendamento da colheita e transporte dos produtos florestais colhidos. No desenvolvimento da metodologia considerou-se as características dos cenários florestais, dos talhões que podem ser colhidos, das demandas pelos produtos, das frentes de corte disponíveis e dos centros de demanda. A metodologia proposta baseou-se na metaheurística *Simulated Annealing* e visa otimizar o planejamento florestal para um curto horizonte de planejamento. Esta metodologia se mostra inovadora, pois não foram encontrados outros trabalhos na literatura que apresentassem métodos de solução integrada para a colheita e o transporte de produtos florestais. Foram utilizados três valores diferentes para o parâmetro de atualização da temperatura do *Simulated Annealing* e os resultados mostraram que a metodologia é capaz de otimizar este problema integrado, atingindo uma melhoria média de 30% em relação à primeira solução factível encontrada. Para avaliar o método proposto, foi elaborado um modelo de Programação Linear Inteira Mista para o problema integrado proposto na tese. A comparação entre o desempenho do método proposto e do modelo matemático, para um mesmo período de tempo, demonstrou a eficácia das soluções obtidas pelo método. As soluções também demonstraram que os três valores diferentes para o parâmetro de atualização da temperatura do *Simulated Annealing* não apresentaram diferenças em nível de 5% de significância.

Palavras-chave: Planejamento florestal operacional. Colheita florestal. Transporte de produtos florestais. *Simulated Annealing*.

ABSTRACT

Since the 1960s, several papers have been developed about the use of Operations Research techniques in forest planning. From the 1980s to the 1990s, these papers were divided in hierarchical planning levels. These papers presented application of different Operations Research techniques on Linear Programming, Heuristics and Metaheuristics. Although the focus of this thesis is on the operational level of forest planning, it also seeks to present a broad review about the papers which dealt with these applications of Operations Research techniques on forest planning. The aim of this paper is to present an optimization methodology that integrates two crucial problems seen forest planning on the operational level, the scheduling of forest harvesting and the transportation of harvested products. The methodology takes into account characteristics of the forest scenarios, the plots that can be harvested, the demand for forest products, the available harvest teams and the demand centers. The methodology was based on Simulated Annealing metaheuristic and it aims to optimize a short-time forest planning. As there were no other studies in the literature that presented methods of integrated solution for the harvesting and transport of forest products, it can be said that this methodology have an innovative approach. Three different values for temperature update parameter of Simulated Annealing were used for and results showed that the proposed methodology was able to optimize this integrated problem, reaching a 30% increase over the first feasible solution found. A Mixed-Integer Linear Program model for integrated problem was developed in order to evaluate proposed methodology. Comparison between methodology performance and model performance showed the efficiency of methodology to find solutions, in the same period. Also, the three different parameters for temperature update on Simulated Annealing did not show significant differences at the 5% level.

Keywords: Operational forest planning. Forest harvesting. Transportation of forest products, Simulated Annealing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 –	EXEMPLO DE MAPA DE LOCALIZAÇÃO DE UMA FLORESTA APRESENTANDO SEUS TALHÕES	18
FIGURA 2 –	EXEMPLOS DE EMPRESAS QUE CONSOMEM PRODUTOS FLORESTAIS: (a) SERRARIA; (b) INDÚSTRIA DE PAPEL	19
FIGURA 3 –	(a) EXEMPLO DE MEMBRO DE EQUIPE DE CORTE MANUAL EQUIPADO COM MOTOSSERA; (b) EXEMPLO DE HARVESTER UTILIZADO EM EQUIPE DE CORTE MECANIZADO	20
FIGURA 4 –	EXEMPLO DE VEÍCULO PARA TRANSPORTE DOS PRODUTOS FLORESTAIS.....	22
FIGURA 5 –	DIAGRAMA DOS PRINCIPAIS NÍVEIS DE PLANEJAMENTO FLORESTAL	26
FIGURA 6 –	RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E A PROBABILIDADE DE ACEITAÇÃO DE UM NOVO ESTADO DE ENERGIA.....	53
FIGURA 7 –	INFORMAÇÕES DE UM CENÁRIO FLORESTAL.....	63
FIGURA 8 –	FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	70
FIGURA 9 –	COMPARATIVO ENTRE AS MÉDIAS DA MELHOR SOLUÇÃO E DA 1ª SOLUÇÃO FACTÍVEL OBTIDA POR CENÁRIO PARA $\alpha = 0,99$	79
FIGURA 10 –	COMPARATIVO ENTRE AS MÉDIAS DA MELHOR SOLUÇÃO E DA 1ª SOLUÇÃO FACTÍVEL OBTIDA POR CENÁRIO PARA $\alpha = 0,95$	80
FIGURA 11 –	COMPARATIVO ENTRE AS MÉDIAS DA MELHOR SOLUÇÃO E DA 1ª SOLUÇÃO FACTÍVEL OBTIDA POR CENÁRIO PARA $\alpha = 0,90$	81

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – ASPECTOS DA DECISÃO POR NÍVEIS HIERÁRQUICOS DE PLANEJAMENTO	29
QUADRO 2 – PARÂMETROS UNIDIMENSIONAIS DO MODELO EXATO.....	56
QUADRO 3 – ÍNDICES DO MODELO EXATO.....	56
QUADRO 4 – PARÂMETROS MULTIDIMENSIONAIS DO MODELO EXATO.	57
QUADRO 5 – VARIÁVEIS DO MODELO EXATO.	58
QUADRO 6 – DADOS DAS FRENTE DE CORTE UTILIZADAS NOS TESTES..	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DE CICLOS DE TEMPERATURA EM CADA CENÁRIO E PARA CADA VALOR DE α .	74
TABELA 2 –	COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DAS QUANTIDADES DE ITERAÇÕES EM CADA CENÁRIO E PARA CADA VALOR DE α ...	75
TABELA 3 –	COMPARAÇÃO ENTRE AS MELHORES SOLUÇÕES OBTIDAS EM CADA CENÁRIO E PARA CADA VALOR DE α	76
TABELA 4 –	COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DA MELHOR SOLUÇÃO OBTIDA EM CADA CENÁRIO E PARA CADA VALOR DE α	77
TABELA 5 –	COMPARAÇÃO ENTRE OS DESVIOS-PADRÃO DA MELHOR SOLUÇÃO OBTIDA EM CADA CENÁRIO E PARA CADA VALOR DE α	78
TABELA 6 –	COMPARAÇÃO ENTRE MODELO EXATO E MÉTODO HEURÍSTICO NO CENÁRIO TESTE 1.....	83
TABELA 7 –	COMPARAÇÃO ENTRE MODELO EXATO E MÉTODO HEURÍSTICO NO CENÁRIO TESTE 2.....	84
TABELA 8 –	COMPARAÇÃO ENTRE MODELO EXATO E MÉTODO HEURÍSTICO NO CENÁRIO TESTE 3.....	85
TABELA 9 –	COMPARAÇÃO ENTRE MODELO EXATO E MÉTODO HEURÍSTICO NO CENÁRIO 1	86
TABELA 10 –	COMPARAÇÃO DETALHADA ENTRE AS SOLUÇÕES DO MODELO EXATO E DO MÉTODO HEURÍSTICO NO CENÁRIO 1	87
TABELA 11 –	COMPARAÇÃO ENTRE AS SOLUÇÕES DO MODELO EXATO E DO MÉTODO HEURÍSTICO	88

LISTA DE SIGLAS

AHP	-	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
ARM	-	<i>Area Restriction Model</i>
DES	-	<i>Discrete-Event Simulation</i>
EGP	-	<i>Extended Goal Programming</i>
EMBRAPA/	-	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro
CNPQ	-	Nacional de Pesquisas de Florestas
GIS	-	<i>Geographic Information System</i>
GRASP	-	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
ILS	-	<i>Iterated Local Search</i>
MARVL	-	<i>Method for Assessment of Recoverable Volume by Log types</i>
MDF	-	<i>Medium-Density fiberboard</i>
MILP	-	<i>Mixed-Integer Linear Problem</i>
MGPC	-	Módulo Gerador dos Padrões de Corte
MGOS	-	Módulo Global de Otimização do Sortimento
MUSYC	-	<i>Multiple Use Sustained Yield Scheduling Calculation</i>
OHS	-	<i>Operational Harvesting Scheduling</i>
OSB	-	Oriented Strand Board
PLIM	-	Problema Linear Inteiro Misto
SADPOF	-	Sistemas de Apoio à Decisão em Planejamento Operacional Florestal
SPEA	-	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
UFPR	-	Universidade Federal do Paraná
URM	-	<i>Unit Restriction Model</i>
VPL	-	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL.....	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	ESTRUTURA DA TESE	15
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	17
2.1	CONCEITOS FLORESTAIS BÁSICOS	17
2.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO.....	22
3	REVISÃO DE LITERATURA	24
3.1	PLANEJAMENTO.....	24
3.2	PLANEJAMENTO FLORESTAL.....	25
3.2.1	Revisão Cronológica de Publicações	30
3.3	<i>SIMULATED ANNEALING</i>	52
4	METODOLOGIA	56
4.1	MODELO MATEMÁTICO	56
4.2	MÉTODO HEURÍSTICO.....	61
4.2.1	Ferramenta de Geração de Cenários Florestais.....	62
4.2.2	Método de Otimização.....	64
4.2.3	Fluxograma do Método Heurístico Proposto	70
5	RESULTADOS COMPUTACIONAIS	71
5.1	CENÁRIOS DE TESTE	71
5.2	TESTES COM O MÉTODO HEURÍSTICO.....	71
5.2.1	Parâmetros	71
5.2.2	Resultados dos Testes	72
5.3	TESTES COM O MODELO MATEMÁTICO	82
5.3.1	Testes Preliminares.....	82
5.3.2	Resultados dos Testes	85
6	DISCUSSÃO	89
7	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

O planejamento é parte fundamental no desenvolvimento das empresas, independente do ramo explorado. Bateman e Snell (1998) dividem o planejamento em três níveis hierárquicos, que diferem-se basicamente em termos de horizonte de planejamento e tipo de trabalho desenvolvido. No nível estratégico, que é formado pelos grandes executivos da empresa, planejam-se as ações a longo prazo. No nível tático, que é uma conexão entre o alto escalão e o escalão gerencial, decidem-se as atitudes a serem tomadas a médio prazo, a fim de atingir objetivos traçados no nível estratégico. Por último, o operacional, que contempla o escalão gerencial e as equipes de ação da empresa, abrange o agendamento de ações pontuais de curto prazo que devem ser tomadas para suprir as demandas levantadas. No nível operacional, trabalha-se com o cenário criado pelos níveis anteriores e tem-se à disposição o que o nível estratégico projetou e o nível tático implementou.

No caso do planejamento florestal não é diferente. Isto porque, no nível estratégico, decide-se por áreas de plantio e épocas de colheita de cada talhão*. No nível tático ocupa-se em viabilizar o acesso a esses talhões e preparar os talhões para colheita. E, no nível operacional, com um cenário previamente criado, decidem-se quais frentes de corte serão designadas a cada talhão e para quais centros consumidores serão enviados os produtos florestais* colhidos.

A presente tese apresenta uma metodologia de otimização do planejamento florestal operacional baseado na metaheurística *Simulated Annealing*. A seguir são apresentados os objetivos desta tese, a justificativa e a estrutura da tese.

*: Conceitos florestais tais como talhão, produtos florestais, frentes de corte e centros consumidores serão melhor descritos no capítulo 2.

1.1 OBJETIVO GERAL

Elaborar um novo método para otimizar o planejamento florestal operacional, com a integração do agendamento da colheita e do transporte da madeira, utilizando a metaheurística *Simulated Annealing*.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral desta tese os principais objetivos específicos são:

- Estudar o planejamento florestal por meio dos níveis hierárquicos e apresentar as características que envolvem a colheita e o transporte de produtos.
- Utilizar a ferramenta de geração de cenários florestais apresentada por Santos, Silva e Arce (2016) para criar os cenários de teste para o método proposto.
- Propor e implementar um modelo matemático capaz de resolver o problema do planejamento florestal operacional integrado.
- Propor e implementar um método heurístico capaz de obter boas respostas para o planejamento florestal operacional nos cenários criados.
- Comparar e analisar a viabilidade das soluções obtidas e debater a aplicação nas empresas florestais.

1.3 JUSTIFICATIVA

Em 2008, num artigo de opinião escrito para o site www.colheitademadeira.com.br, o professor Julio Arce destacou que “no Brasil temos provavelmente as florestas mais produtivas do mundo” (ARCE; 2008). Neste artigo, o autor reforça a importância de se otimizar o planejamento florestal. Ele propõe que, apenas utilizando recursos que

tem a sua disposição e ajustes no sequenciamento da produção florestal, uma empresa é capaz de aumentar sua receita líquida.

Este é apenas um, entre as dezenas de trabalhos publicados, que reforça a importância de se otimizar este ramo de planejamento. Uma empresa do setor florestal pode movimentar mensalmente dezenas, quiçá centenas, de milhões de reais. Logo, qualquer otimização na casa de 1% resultará em ganhos absolutos. Assim sendo, fica claro que esta linha de pesquisa precisa ser aprofundada. Como a complexidade dos problemas de planejamento florestal otimizado são de alta magnitude faz-se necessário o conhecimento de técnicas de otimização compatíveis a esta complexidade.

Desta forma, abre-se a possibilidade de desenvolver e implementar computacionalmente um método baseado em metaheurística para a otimização do agendamento da colheita florestal e o transporte dos produtos, já que a literatura não apresenta métodos eficazes para esta otimização integrada.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esse trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro, apresenta-se a introdução do tema, ressaltando os objetivos e a importância dessa pesquisa.

No segundo capítulo é realizada a descrição do problema estudado, com a definição dos conceitos florestais necessários que envolvem o problema abordado, a descrição do problema de planejamento florestal operacional envolvendo a integração entre a colheita e o transporte de produtos.

No terceiro capítulo é realizada a revisão de literatura abordando os trabalhos desenvolvidos até o momento. A revisão apresenta uma ampla abordagem a respeito do planejamento florestal e uma breve revisão a respeito da metaheurística *Simulated Annealing*.

No quarto capítulo apresenta-se um modelo matemático na forma de um problema de programação linear inteira mista (PLIM) para a solução do problema florestal apresentado. A seguir, apresentam-se as

características da ferramenta de geração de cenários florestais, a metodologia de otimização proposta e o fluxograma que ilustra este método.

O quinto capítulo inicia com a descrição dos cenários de teste que foram utilizados e os parâmetros de teste escolhidos. Na sequência são apresentados os resultados dos testes computacionais e uma análise acerca dos resultados obtidos.

O sexto capítulo discute os resultados e as análises feitas, apresentando as conclusões e algumas sugestões de trabalhos futuros para esta área.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

2.1 CONCEITOS FLORESTAIS BÁSICOS

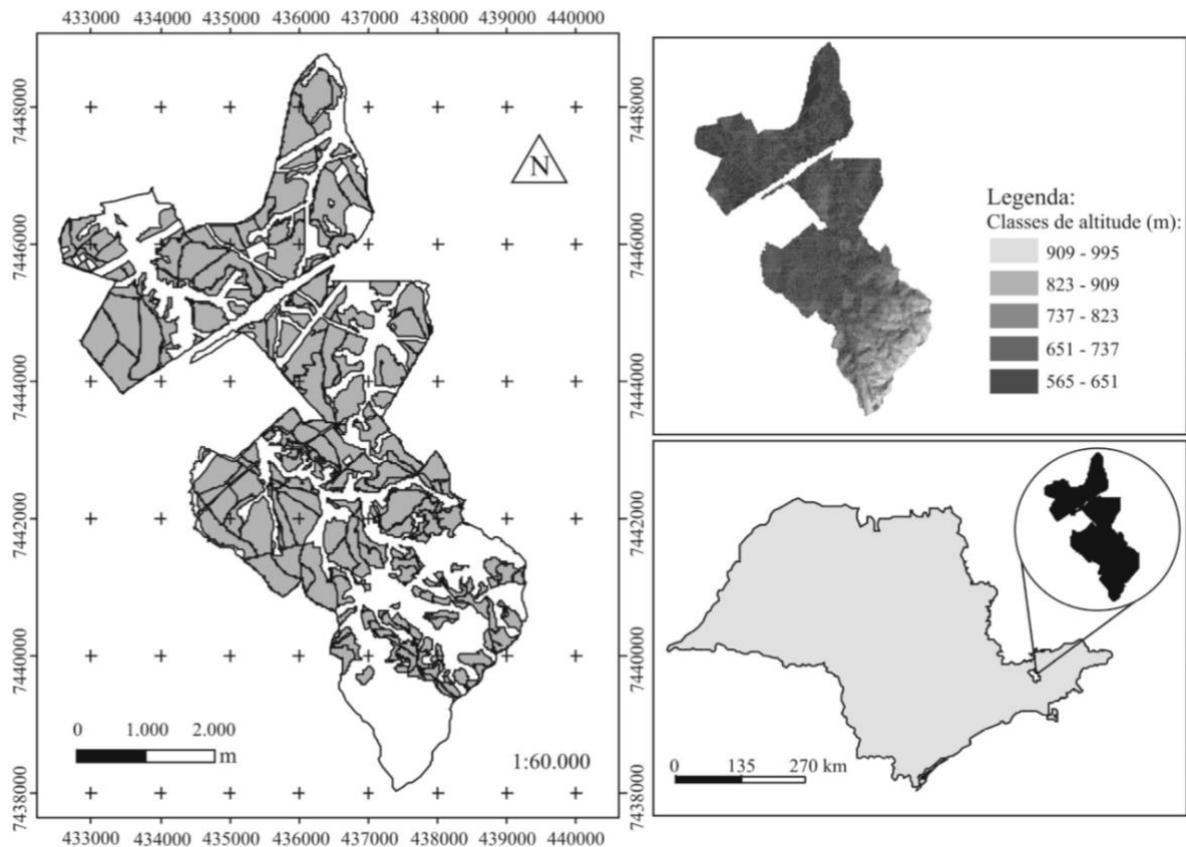
São muitos os conceitos florestais importantes para o entendimento dos problemas que envolvem o planejamento florestal em seus diversos aspectos. Como a presente tese está focada no planejamento florestal operacional, envolvendo a colheita e o transporte de madeira, optou-se por descrever os conceitos de talhão, produtos florestais, centros consumidores, frentes de corte e transporte de produtos. São estes:

- a) Talhão – Um talhão florestal caracteriza-se por ser a menor unidade de cultivo com itens em comum, principalmente a espécie plantada¹ e a data de plantio. Esta homogeneidade circunstancial não impede que o talhão produza diferentes produtos florestais no que se refere ao diâmetro das árvores plantadas e ao comprimento dos cortes efetuados. Pode-se associar a cada talhão sua área e também a produtividade destes diferentes produtos em metros cúbicos por hectares. Conhecida a área e a produtividade, sabe-se quanto retirar de cada produto ao se efetuar um corte raso². Assim, em função da produtividade, cada talhão será classificado por um diferente tipo. A Figura 1 apresenta como exemplo o mapa de uma floresta dividida em talhões.

¹ Cada talhão é plantado com uma única espécie (Pinus, Eucalipto, Teca, etc.).

² Colheita do Talhão onde se extrai toda a madeira disponível.

FIGURA 1 – EXEMPLO DE MAPA DE LOCALIZAÇÃO DE UMA FLORESTA APRESENTANDO SEUS TALHÕES



FONTE: Gomide, Arce e Silva (2009)

- b) Produtos Florestais – De uma mesma árvore podem ser extraídos uma diversidade de produtos florestais que se caracterizam pelo comprimento da tora produzida, diâmetro da tora e pela espécie de árvore. Estes produtos serão destinados a diferentes centros consumidores de acordo com as demandas apresentadas por estes centros. Tomando como exemplo o *Pinus*, os ramos mais finos podem ser utilizados na indústria de celulose, enquanto toras mais grossas podem ter sua utilização feita em serrarias, indústrias de OSB (*Oriented Strand Board*) e MDF (*Medium-density fiberboard*), laminação para compensados e indústrias moveleiras.
- c) Centros Consumidores – São os demandantes da empresa florestal. São eles que apresentam as demandas à empresa, que decidirá quais os produtos deverão ser colhidos a fim de atendê-la. É importante notar que o tipo de produto

demandado está em consonância com a atividade desenvolvida pelo centro consumidor. São exemplos de centros consumidores: as fábricas de papel que demandam por celulose; as serrarias e laminadoras que demandam por toras de diferentes comprimentos e diâmetros; as empresas de energia que demandam de carvão vegetal. É necessário considerar que cada centro consumidor se encontra numa localidade diferente e com distâncias diferentes em relação aos talhões. A Figura 2 apresenta dois exemplos de centros consumidores (uma serraria e uma indústria de papel).

FIGURA 2 – EXEMPLOS DE EMPRESAS QUE CONSOMEM PRODUTOS FLORESTAIS: (a) SERRARIA; (b) INDÚSTRIA DE PAPEL



(a)



(b)

FONTE: (a) <http://www.madeireiraxola.com.br/serraria-em-braganca-paulista-sp.asp>
(b) <http://www.suzano.com.br/negocios-e-produtos/celulose/>

d) Frentes de corte – São as equipes responsáveis pelo corte dos talhões e colheita dos produtos florestais. Para este fim, as empresas utilizam equipes de trabalho de diferentes configurações. As equipes podem ser concebidas de forma altamente mecanizada, com equipamentos de custo elevado, ou compostas por pessoas munidas de motosserra. Devido a características operacionais e topográficas a mesma frente de corte pode apresentar produtividades e rendimentos diferentes, para um mesmo talhão ou talhões diversos. Há que se considerar o custo de locomoção relacionado às frentes de corte. Uma frente de corte mecanizada apresenta um alto custo de deslocamento, enquanto que uma frente composta por pessoas munidas de motosserra apresenta custo de deslocamento baixo. Atualmente, as empresas florestais brasileiras têm investido em frentes de corte mecanizadas, reduzindo ao mínimo necessário as frentes de corte manuais. A Figura 3 apresenta dois tipos de frentes de corte sendo uma equipe manual e uma equipe mecanizada.

FIGURA 3 – (a) EXEMPLO DE MEMBRO DE EQUIPE DE CORTE MANUAL EQUIPADO COM MOTOSSERA; (b) EXEMPLO DE HARVESTER UTILIZADO EM EQUIPE DE CORTE MECANIZADO



(a)



(a)

FONTE: (a) <https://conceito.de/exploracao-florestal>; (b) <https://www.deere.com.br/pt/harvesters/>

- e) Transporte dos produtos – Após a colheita, a produção precisa ser transportada até os centros consumidores. O transporte pode apresentar problemas em relação aos períodos de chuva, pois, certos talhões apresentam más condições de acesso em períodos chuvosos. O custo com o transporte é determinante e deve ser considerado para cálculo do custo final, pois em determinadas situações os talhões com maior produtividade dos produtos demandados podem se encontrar distantes dos centros consumidores que demandam estes produtos. A Figura 4 mostra um veículo utilizado no transporte de produtos florestais.

FIGURA 4 – EXEMPLO DE VEÍCULO PARA TRANSPORTE DOS PRODUTOS FLORESTAIS



FONTE: <http://www.midiatruckbrasil.com/2015/11/video-scania-testa-configuracao-para.html>

2.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO

Com estes conceitos definidos, trata-se, então, do problema florestal que se deseja apresentar nesta tese. No trabalho de Rönnqvist et al. (2015) os autores apresentaram 33 problemas em aberto na área florestal onde se pode aplicar técnicas de Pesquisa Operacional para buscar soluções. Serão citados mais detalhes a respeito deste trabalho no capítulo de Revisão de Literatura, porém pode-se adiantar que o problema número 2 apresentado pelos autores é: “Como modelar e resolver de forma integrada o agendamento, diário ou semanal, da colheita florestal e as decisões acerca do transporte da madeira?” (Rönnqvist et al., 2015, p. 14, tradução nossa).

De acordo com os autores supracitados, existem trabalhos que apresentam uma solução integrada entre agendamento de colheita e transporte de madeira para períodos longos, acima de 12 meses, em florestas na Suécia. Estes mesmos autores ressaltam a vantagem na otimização da colheita e transporte de produtos florestais de forma integrada. Porém, assim como o autor desta tese, não encontraram

outras pesquisas que tenham apresentado uma solução integrada para períodos curtos de horizonte de planejamento.

O método que apresentaremos para otimizar o planejamento florestal busca uma solução de mínimo custo para o agendamento das frentes de corte nos talhões e para o transporte da madeira dos talhões até os centros de demanda. Leva-se em consideração as características de cada frente, de cada talhão e as demandas pelos produtos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Como a presente tese aborda uma metodologia de resolução do problema de Planejamento Florestal Operacional utilizando a metaheurística *Simulated Annealing*, o capítulo de revisão bibliográfica foi dividido em três partes: na primeira parte apresenta-se uma breve introdução sobre Planejamento, na segunda faz-se uma revisão sobre o assunto do Planejamento Florestal e na terceira uma revisão sobre a metaheurística *Simulated Annealing*.

3.1 PLANEJAMENTO

De acordo com Bateman e Snell (1998), as organizações podem ser divididas em nível estratégico, nível tático e nível operacional, de acordo com o tipo de trabalho que cada nível desenvolve. O planejamento no nível estratégico compreende os altos executivos da organização, responsáveis pela definição dos objetivos e planos da empresa, e tomada de decisões quanto às questões de longo prazo da empresa, como: sua sobrevivência, crescimento e eficácia geral. O planejamento, no nível tático, é utilizado para traduzir os objetivos gerais e as estratégias da alta diretoria em objetivos e atividades mais específicos. O principal desafio neste nível é promover um contato eficiente e eficaz entre o nível estratégico e o nível operacional. No planejamento operacional, onde o objetivo é implementar os planos específicos definidos no planejamento tático, o processo é de menor amplitude e o foco é trabalhar junto aos funcionários não administrativos.

Uma outra característica que distingue os níveis hierárquicos é o prazo do planejamento. O nível estratégico, como já mencionado, caracteriza-se por planos de longo prazo, enquanto que o nível tático busca traduzir estes planos em objetivos específicos de médio prazo apontando atitudes que devem ser implementadas a fim de atingi-los. Já no nível operacional o planejamento é realizado de forma a estabelecer cronogramas curtos de atividades específicas para cada setor da

organização de forma a atender as demandas levantadas no planejamento estratégico e atingir os objetivos específicos do planejamento tático. O planejamento operacional é geralmente realizado com prazos diários ou semanais.

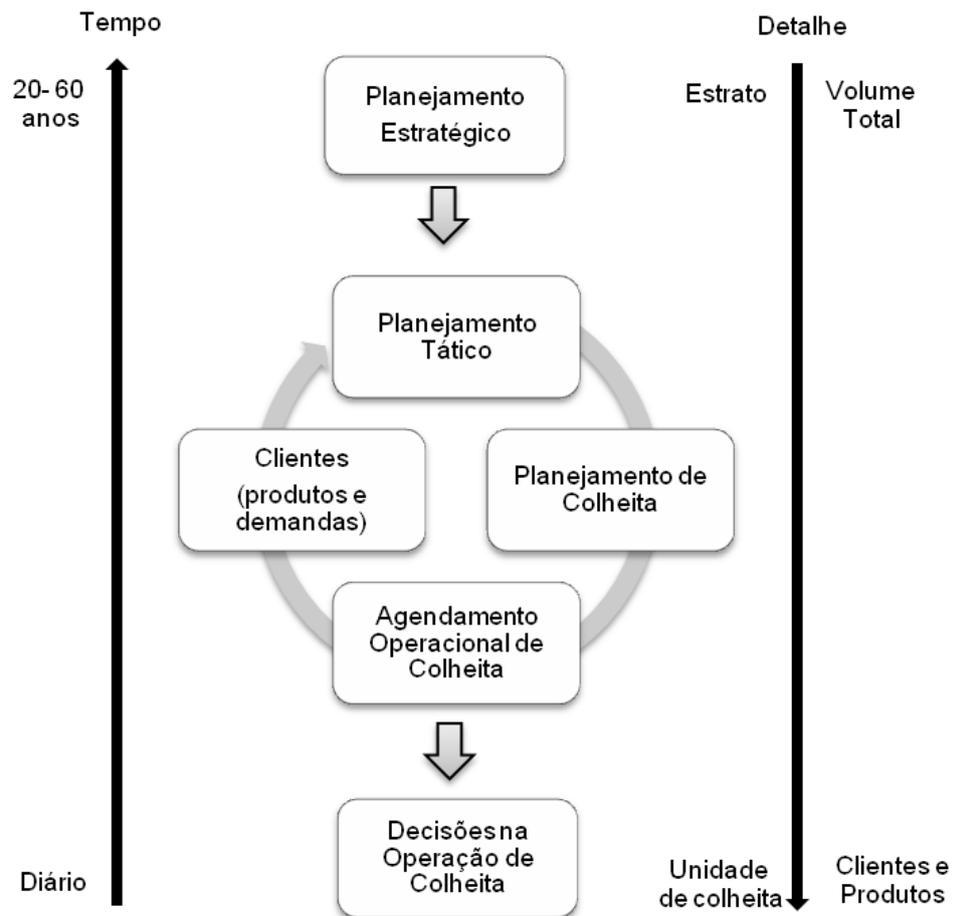
3.2 PLANEJAMENTO FLORESTAL

Os níveis hierárquicos de planejamento, apresentados anteriormente, também podem ser encontrados no planejamento florestal. De acordo com Andersson (2005), a classificação hierárquica para o planejamento florestal foi introduzida no final da década de 80. Porém, somente com Weintraub e Cholaky (1991) é que os conceitos hierárquicos foram finalmente aplicados ao planejamento florestal, separando as atividades do planejamento em estratégico, tático e operacional.

Segundo Zagonel (2005), o conjunto de atividades que visam derrubar, extrair e transformar a madeira em diferentes produtos está associado ao planejamento da colheita florestal em todos os níveis, estratégico, tático e operacional (longo prazo, médio prazo e curto prazo, respectivamente). As atividades relacionadas à escolha do sistema de exploração, do consumo dos produtos florestais, das vendas, do transporte destes produtos e da conservação do Meio Ambiente estão, também, associados ao mesmo planejamento, segundo o autor supracitado.

Mitchell (2004) destaca que os vários processos envolvidos no gerenciamento de recursos florestais deveriam ser conjuntamente planejados para evitar soluções não otimizadas. Fatores como a estrutura organizacional das companhias florestais, a magnitude de dados e a complexidade dos sistemas têm direcionado o estabelecimento de uma hierarquia de fases de planejamento. O autor apresenta uma hierarquia que pode ser representada pela Figura 6.

FIGURA 5 – DIAGRAMA DOS PRINCIPAIS NÍVEIS DE PLANEJAMENTO FLORESTAL



FONTE: Mitchell (2004, tradução nossa)

O planejamento estratégico envolve aquisição de terra e construção ou expansão de fábrica (WEINTRAUB, GUITART e KOHN, 1986), além de associações entre grupos de investimento com atenção à viabilidade do empreendimento, aos resultados da empresa e o melhor aproveitamento dos recursos (ASSUMPÇÃO, 1996). Segundo Gunn (1991), o objetivo principal é investigar os recursos florestais que o empreendimento tem à sua disposição para definir a capacidade de produção de seus vários segmentos. É neste nível de planejamento que se definem a separação dos talhões, de acordo com os objetivos de produção da empresa, determina-se quais espécies serão cultivadas em cada talhão e as respectivas épocas de colheita. O nível estratégico é caracterizado por horizontes de planejamento relativamente longos, ao menos duas ou três rotações, geralmente acima de 20 anos. É neste

nível que se enquadram os modelos de programação linear Tipo I e Tipo II propostos por Johnson e Scheurman (1977).

No planejamento tático, de acordo com Machado e Lopes (2002), deve-se analisar o tempo das rotações dos talhões, a extensão das áreas plantadas, a diversidade de fatores técnicos, econômicos e ambientais, a política econômica e a própria atividade florestal, considerando as peculiaridades de cada empresa, seu ambiente interno e externo a serem desenvolvidos. Quando, onde e como realizar a colheita de madeira, satisfazendo as exigências do consumidor são fatores relacionados às decisões táticas (WEINTRAUB et al., 1994; MALINOVSKI, 2007). Inclui-se neste nível de planejamento as atividades de projeção da colheita determinando-se a produtividade de cada talhão para cada possível produto que dele pode ser extraído. Deve-se determinar, também, a malha viária necessária para proporcionar o deslocamento das frentes de corte, levando em consideração as necessidades para o deslocamento de todo o maquinário de colheita e o escoamento da produção para os centros de armazenamento e/ou clientes. Para tal determinação, deve-se ter clareza dos objetivos da empresa quanto à venda dos produtos, pois quanto maior a quantidade de produtos fornecidos maior será a complexidade para decidir, na hora da colheita, quais produtos deverão ser extraídos e as quantidades. Segundo Arce, Macdonagh e Friedl (2004), enquanto apenas um comprimento de tora for retirado da floresta o procedimento de colheita é simples, porém com multiprodutos florestais cresce a complexidade combinatória para otimizar o traçamento das toras.

Segundo Santana (2013), o planejamento operacional de colheita é o último nível da hierarquia e poderia ser segmentado em diversas etapas de acordo com a magnitude e complexidade operacional do negócio. Para que ocorra de forma satisfatória é necessário considerarmos os recursos, processos, decisões e serviços relativos a diferentes escalas de tempo dentro do primeiro ano do horizonte de planejamento. As decisões operacionais referem-se a como destinar máquinas, equipes de trabalho e veículos de transporte (GUNN, 1991). É essencial ter o conhecimento e controle dos fatores, permitindo o

estabelecimento de estratégias e práticas operacionais para execução das operações dentro de critérios estabelecidos (MACHADO e LOPES, 2002). É importante destacar que o nível operacional apresenta um grau de complexidade grande, pois lida com diversas variáveis como: a disponibilidade e o deslocamento das diferentes frentes de corte, a produtividade diferenciada de cada frente de corte em relação a cada talhão disponível para colheita, os diferentes produtos que podem ser colhidos em cada talhão e as demandas apresentadas pela empresa de cada produto, o transporte dos produtos pós-colheita até centros de “estoque” ou diretamente aos clientes. Além disso, por ser o nível hierárquico que planeja em curto prazo (agendas diárias), as soluções devem ser celeremente encontradas e com grau de detalhamento grande a fim de facilitar as atividades de cada setor envolvido na colheita, produção e entrega de produtos florestais.

Segundo Machado e Lopes (2002), os métodos mais comuns para o planejamento da colheita podem ser classificados como: método imitativo, que segue fielmente exemplos de outros empreendimentos; método de tentativa, que busca associar as situações atuais com as experiências passadas, correndo o risco de basear-se somente em sua intuição; método científico, que se apoia em condições lógicas, baseadas em dados coletados.

O trabalho de Gunn (1991) apresenta ainda um quadro interessante onde se pode separar, dentro dos três níveis hierárquicos, alguns aspectos inerentes ao processo de tomada de decisão no planejamento florestal (Quadro 1).

QUADRO 1 – ASPECTOS DA DECISÃO POR NÍVEIS HIERÁRQUICOS DE PLANEJAMENTO

Componentes da Decisão	Atributos da Decisão Componente por Nível Hierárquico		
	Planejamento Estratégico	Planejamento Tático	Planejamento Operacional
Objetivo	Aquisição dos Recursos	Utilização dos Recursos	Execução
Horizonte de Planejamento	Longo	Médio	Curto
Nível de Gestão	Alto	Médio	Baixo
Escopo	Amplio	Médio	Restrito
Fonte de Informação	Externa e Interna	Externa e Interna	Interna
Nível de Detalhamento	Altamente Agregado	Moderadamente Agregado	Altamente Detalhado
Grau de Incerteza	Alto	Médio	Baixo
Grau de Risco	Alto	Médio	Baixo

FONTE: Gunn (1991, tradução nossa).

Pesquisadores chilenos, liderados pelo professor Weintraub, desenvolveram vários sistemas de gestão específicos para setores do planejamento florestal. Para o nível de planejamento estratégico foi desenvolvido o sistema MEDFOR, ao passo que para o nível tático foi desenvolvido o sistema OPTIMED. Como o planejamento operacional apresenta uma gama de variáveis e restrições, foram desenvolvidos três sistemas de gestão com finalidades específicas para cada área deste nível hierárquico. O PLANEX realiza o planejamento da malha viária (atividade em conjunto ao planejamento tático) e a alocação do maquinário e dos veículos de transporte. O OPTICORT é um sistema de agendamento da colheita que designa os padrões de corte para cada talhão, a frente de corte que deverá atuar e os períodos da colheita. O ASICAM realiza o agendamento da frota de transporte (EPSTEIN et al., 1999).

Este trabalho foi implantado com patrocínio de indústrias florestais chilenas e com fundos do governo. Os autores destacam os

seguintes benefícios para a indústria florestal chilena: “devido ao uso de três sistemas de pesquisa operacional, relatórios da Bosques Arauco apontam que aproximadamente US\$ 8 milhões foram economizados no primeiro ano em um total de despesas com operações florestais de US\$140 milhões.” (EPSTEIN et al., 1999, p. 8).

Sendo estas as características fundamentais dos problemas que envolvem o Planejamento Florestal, em seus diversos níveis, segue uma revisão cronológica dos trabalhos, artigos e livros que foram publicados ao longo das últimas décadas sobre a Otimização no Planejamento Florestal.

3.2.1 Revisão Cronológica de Publicações

A gênese deste ramo de pesquisa está na década de 60 com a publicação dos trabalhos de Curtis (1962) e Loucks (1962) no periódico *Journal of Forestry*, do trabalho de Leak (1964) para o Departamento de Agricultura dos EUA e do trabalho de Nautiyal e Pearse (1967) no periódico *Forest Science*.

No início da década de 70 destaca-se o trabalho de Pnevmticos e Mann (1972), os autores utilizaram programação dinâmica na otimização da colheita. Entretanto, foram os trabalhos de Navon (1971), em conjunto com o Serviço Florestal Norte Americano, e de Ware e Clutter (1971), da Universidade da Georgia, em colaboração com a indústria de celulose do sul dos EUA, que marcaram a arrancada da utilização da programação linear no planejamento florestal com maior intensidade. O primeiro trabalho apresentou o sistema Timber RAM (Timber Resource Allocation Method) e deu origem a uma série de sistemas usados pelo Serviço Florestal Norte Americano, entre os quais figuram o FORPLAN (IVERSON e ALSTON, 1986) e o SPECTRUM (USDA, 1995).

No final da década de 70 foi desenvolvido um dos trabalhos mais importantes nesta área de pesquisa. Foram os autores Johnson e Scheurman (1977) que publicaram no *Forest Science – Monograph 18*, que pode ser considerado um dos trabalhos mais citados no estudo do

Planejamento Florestal com a utilização de Pesquisa Operacional. Foi neste trabalho que os autores classificaram o que se havia trabalhado, até então, em dois modelos padrão para Otimização no Planejamento Florestal Estratégico, sempre buscando decidir quando, onde e como atuar (plantio, desbaste, poda, colheita, etc.). Esses modelos foram nomeados como Tipo I e Tipo II. O modelo Tipo I, que inclui o formato apresentado por Loucks (1964), trabalha com um controle geográfico da floresta e com um número maior de variáveis. Já o modelo Tipo II, que inclui o formato apresentado por Nautiyal e Pearse (1967), não trabalha com controle geográfico da floresta e apresenta um número reduzido de variáveis.

Além dos trabalhos acima mencionados, no final da década de 70 mais dois importantes trabalhos foram publicados. No primeiro, os autores Deadman e Goulding (1979) apresentam um sistema de inventário florestal nomeado de MARVL (*Method for Assessment of Recoverable Volume by Log types*). No segundo, os autores Johnson, Jones e Daniel (1979) publicaram um manual do sistema de suporte à decisão nomeado MUSYC (*Multiple Use Sustained Yield scheduling Calculation*).

No Brasil, foi apenas no começo da década de 80 que Borges (1981) publicou sua dissertação de mestrado na UFPR, onde busca maximizar o volume de madeira serrada, utilizando funções polinomiais, visando obter de cada árvore o número máximo de peças serradas com as maiores dimensões.

Na década de 80, também, foram publicados alguns livros que apresentam uma boa introdução ao assunto de Planejamento Florestal utilizando Pesquisa Operacional. Entre as publicações destacam-se as obras de Clutter (1983), Leuschener (1984) e Davis e Johnson (1987). Duas obras publicadas nessa década são consideradas referência no assunto, pois além de apresentarem uma boa fundamentação teórica expõem uma variedade de exemplos práticos que ilustram cada um dos métodos e problemas abordados. As obras de referência são dos autores Dykstra (1984) e de Buongiorno e Gillless (1984) que, embora sejam da década de 80, ainda são utilizados como livro-texto de disciplinas da

área de Planejamento Florestal em diversos cursos de graduação e pós-graduação.

Ainda na década de 80 publicaram-se alguns outros trabalhos interessantes sobre o Planejamento Florestal. Entre eles destacam-se os seguintes autores e trabalhos: Faaland e Briggs (1984), os autores utilizaram Programação Dinâmica para resolver o problema do corte ótimo das árvores em produtos serrados; Taube Netto (1984) apresenta um modelo de programação linear para planejamento de florestas de eucalipto, nomeado de PLANFLOR; Rodriguez et al. (1986) apresentam uma aplicação prática do uso de Programação Linear no Planejamento Florestal; Eng, Dallenbach e White (1986) empregam Programação Dinâmica e Programação Linear para gerar os padrões de corte utilizando o método de decomposição de DANTZIG-WOLFE; Mendoza e Bare (1986) utilizam a técnica de geração de colunas para gerar o conjunto de padrões de corte; Weintraub, Guitart e Kohn (1986) fazem uma ampla abordagem sobre o Planejamento Florestal Estratégico; e próximo ao final da década de 80 foi publicado o trabalho de Sessions, Olsen e Garland (1989) onde os autores utilizam heurísticas para também gerar os padrões de corte.

A década de 90 destaca-se pela publicação de dezenas de trabalhos na área do Planejamento Florestal e por obras como as de Von Gadow e Bredenkamp (1992), Hof (1993) e Hof e Bevers (1998). No início da década, Rodriguez (1991) publicou um modelo básico de tomada de decisão no Gerenciamento da Produção Florestal. O autor trabalha com a determinação da idade ótima de corte, a maximização do incremento médio anual e a determinação da maturidade financeira, utilizando Programação Linear no Planejamento Estratégico de modelos Tipo I e Tipo II (JOHNSON e SCHEURMAN, 1977). No mesmo ano, Gunn (1991) apresentou no *Symposium On Systems Analyses In Forest Resources* um importante trabalho onde apresenta diversos aspectos sobre os níveis hierárquicos do Planejamento Florestal (Estratégico, Tático e Operacional). Este trabalho foi mencionado por diversos autores que nos anos seguintes publicaram sobre o Planejamento Florestal.

Na sequência, surgiram quatro trabalhos interessantes utilizando técnicas diferentes para a otimização do Planejamento Florestal. O de Lockwood e Moore (1993) que apresenta a utilização da metaheurística *Simulated Annealing* no agendamento da colheita da madeira com restrições espaciais. O de Hof e Joyce (1993) que, também, considera restrições espaciais na colheita florestal e utiliza Programação Linear Inteira Mista para otimizar o agendamento da colheita. O de Laroze e Greber (1993) se destaca pelo fato de os autores utilizarem a técnica de Simulação de Monte Carlo para gerar os padrões de corte para a colheita e o de Weintraub et al. (1994) que apresenta uma heurística para otimizar modelos de Planejamento Florestal em nível hierárquico Tático, considerando restrições de integridade.

No Brasil, a tese de doutorado de Oliveira (1995), realizada em conjunto com a EMBRAPA/CNPF (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisas de Florestas), apresenta o desenvolvimento do SISPINUS, um sistema para prognose do crescimento e da produção de *Pinus spp.* no Sul do Brasil, visando avaliar os regimes de manejo. Cabe ressaltar que este sistema não é alimentado com informações de demanda. Ogwen, no mesmo ano, defende sua tese na *University of Canterbury*, onde trabalha com uma proposta de otimização integrada da colheita de madeira nos níveis Tático e Operacional do Planejamento Florestal.

O trabalho de Stape (1997) envolve o Planejamento Operacional, mas com a finalidade de determinar técnicas para otimizar o método de colheita conhecido como talhadia simples – maiores informações sobre a talhadia podem ser encontrados em Pancel (1993) e Stape (1997). Neste trabalho, o autor apresenta fatores que podem interferir na qualidade da talhadia simples e como combatê-los a fim de aumentar a produtividade da floresta. Naquele ano, Laroze e Greber (1997) publicaram um trabalho que, semelhante ao publicado em 1993, busca gerar os padrões de corte para a colheita, porém desta vez utilizando o método de Busca Tabu.

O trabalho de Andrade e Leite (1998) apresenta um método capaz de quantificar os multiprodutos que podem ser obtidos de árvores

individuais a partir de uma unidade estere. Este é um dos primeiros trabalhos do Brasil que considera a colheita de multiprodutos e busca otimizá-la. No mesmo ano, Murphy (1998) publicou um trabalho que utiliza Busca Tabu para otimizar a geração de padrões de corte e também a alocação das Frentes de Corte em relação aos talhões que serão colhidos.

No final da década de 90 surgiram alguns trabalhos interessantes como o de Laroze (1999) e a dissertação de mestrado de Nobre (1999), defendida na Universidade Federal de Lavras. O primeiro apresenta um método de Busca Tabu aliado à Programação Linear a fim de otimizar o traçamento das toras a nível florestal, enquanto Nobre desenvolve uma heurística nomeada de 'Heurística da Razão-R' para o gerenciamento florestal.

Naquele mesmo ano, dois trabalhos apresentaram contribuições mais significativas. O primeiro foi o de Boston e Bettinger (1999), que utiliza três heurísticas diferentes para resolver o problema de agendamento da colheita com restrições espaciais: Simulação de Monte Carlo, *Simulated Annealing* e Busca Tabu. A solução de cada uma das três heurísticas foi comparada à solução ótima obtida a partir de Programação Linear Inteira. As heurísticas *Simulated Annealing* e Busca Tabu apresentaram desempenho superior à Simulação de Monte Carlo. Este trabalho se destaca por ter utilizado mais de dez diferentes padrões de corte na otimização, tornando a complexidade do problema superior aos problemas com poucos padrões.

O segundo trabalho, desenvolvido pela equipe do professor Weintraub, no Chile, e publicado por Epstein et al. (1999), é uma referência no âmbito do Planejamento Florestal. Conforme dito anteriormente, esta equipe desenvolveu cinco sistemas de gestão específicos para cada setor do Planejamento Florestal. O sistema MEDFOR para o nível de planejamento estratégico e o sistema OPTIMED para o nível tático. Para o Planejamento Operacional foram desenvolvidos três sistemas de gestão: o PLANEX que realiza o planejamento da malha viária e a alocação do maquinário e dos veículos de transporte; o OPTICORT que faz o agendamento da colheita e designa

os padrões de corte para cada talhão, além da frente de corte que deverá atuar e dos períodos da colheita; e o ASICAM que realiza o agendamento da frota de transporte. Em particular, o OPTICORT consiste em um módulo de PL combinado com um algoritmo de geração de colunas que, na verdade, é um gerador de padrões de corte tipo *branch-and-bound*. Porém, a partir da ramificação e avaliação iterativa de uma árvore de alternativas, acrescenta-se opções às soluções ótimas encontradas pelo módulo de PL.

A partir do ano 2000, as publicações na área florestal no Brasil expandiram. Este período começa com a publicação de três teses de doutorado, duas defendidas na Universidade Federal de Viçosa (CHICHORRO, 2000; RODRIGUES, 2001) e uma defendida na Universidade Federal do Paraná (ARCE, 2000).

Em sua tese, Chichorro (2000) apresenta uma metodologia de análise estrutural do gerenciamento florestal, com a finalidade de otimizar a colheita de multiprodutos da madeira.

No mesmo ano, mas em Curitiba, a tese defendida por Arce (2000) apresenta um sistema capaz de analisar, simular e otimizar o sortimento florestal em função das demandas por multiprodutos e levando em consideração os custos de transporte. Nesta tese, o autor elencou os métodos matemáticos mais utilizados até o momento para solucionar os problemas de traçamento de árvores e de alocação de toras:

- a) Programação Linear com ou sem variáveis inteiras e binárias;
- b) Programação Dinâmica;
- c) Algoritmos de Geração de Colunas;
- d) Otimização em Redes;
- e) Sistemas especialistas (*Expert Systems*);
- f) Busca Tabu.

O sistema desenvolvido pelo autor é composto por dois módulos principais: o módulo gerador dos padrões de corte (MGPC) e o módulo global de otimização do sortimento (MGOS). O MGPC utiliza um algoritmo heurístico, que identifica os cortes potenciais que devem ser

avaliados ao longo do fuste, e um algoritmo baseado na Programação Dinâmica, que determina a combinação ótima de produtos que maximiza a receita do fuste. O MGOS é formulado como um problema de Programação Linear Inteira Mista submetido a restrições para o volume de madeira, quantidade de produtos e para as demandas, em cada talhão. O autor comenta ainda que a eficiência do sistema poderia ser medida pelos seguintes critérios:

- a) Redução dos resíduos comerciais de madeira;
- b) Aumento no valor total da madeira traçada e baldeada, devido ao sortimento e aos custos de transporte otimizados;
- c) Redução dos custos de classificação na floresta, devido à simulação e controle dos produtos a retirar por talhão e;
- d) Alguma combinação dos fatores mencionados.

No ano seguinte, Rodrigues (2001) apresentou em sua tese o Sysflor, um sistema de suporte à decisão em planejamento florestal. Este sistema já havia sido apresentado pelo autor da tese, em conjunto com outros autores, em Rodrigues, Leite e Alves (2000), no Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Este mesmo autor publicou, nos anos seguintes, também em conjunto, mais quatro trabalhos sobre o Planejamento Florestal. Nos três primeiros trabalhos foram tratados problemas de Planejamento Florestal com restrições de Integridade, cada um com uma metaheurística diferente. No primeiro, Rodrigues et al. (2003) utilizam Busca Tabu, no segundo, Rodrigues et al. (2004a) utilizam Algoritmo Genético enquanto no terceiro trabalho, Rodrigues et al. (2004b) utilizam *Simulated Annealing*. Após esta sequência, o autor ainda publicou o trabalho Rodrigues et al. (2006) no qual apresenta um modelo de regulação florestal e as implicações em problemas de Planejamento Florestal com restrições de Recobrimento.

No trabalho de Falcão e Borges (2003), os pesquisadores portugueses apresentam heurísticas com a proposta de integração entre os níveis estratégico e operacional do Planejamento Florestal, porém apenas são tratados aspectos sobre o Planejamento Estratégico. Em nenhum momento são tratados os custos do transporte dos produtos,

quais tipos de produtos serão produzidos e nem sobre como serão as frentes de corte. No trabalho são apresentados dois cenários com horizontes de planejamento longos, 70 anos e 25 anos.

Em seu trabalho, Soares et al. (2003) apresentam uma metodologia de otimização voltada à colheita de multiprodutos florestais. Neste trabalho, os autores ressaltam que “até o momento não se tem conhecimento, na literatura brasileira, da utilização da programação dinâmica na definição do tamanho ideal de toras a serem colhidas em povoamentos florestais” (SOARES et al., 2003). Eles propõem, então, uma metodologia de trabalho onde, inicialmente, decidem quais os tamanhos de toras são mais rentáveis para as finalidades escolhidas (celulose, energia ou serraria) e, em seguida, buscam otimizar o lucro com a comercialização destes produtos. Porém, os autores consideraram que toda a madeira colhida seria comercializada, ignorando restrições de demanda e zerando a perda de material. Eles, também, deixaram o custo do transporte da madeira a cargo dos clientes, facilitando assim o problema.

Os autores Teixeira et al. (2003) desenvolveram um sistema de Planejamento Florestal baseado em Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos. Este sistema possui três módulos básicos, o primeiro é um módulo de dados, onde é possível fornecer as informações necessárias sobre o problema que se deseja otimizar. O segundo módulo é um gerador de prescrições, no qual um algoritmo faz a combinação de todas as possibilidades de manejo para a unidade de produção, levando em consideração o horizonte de planejamento, as idades máxima e mínima de cortes e as formas de condução da floresta. O terceiro módulo é o otimizador, neste módulo foi implementado o algoritmo proposto por Zitzler (1999), denominado SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*). Segundo os autores, a performance do sistema foi satisfatória sobre o conjunto de problemas-teste e vários parâmetros foram definidos por meio de dados reais associados a uma empresa da área florestal.

Em Arce, MacDonagh e Friedl (2004), os autores desenvolveram uma metodologia para otimizar o traçamento de fustes de árvores,

utilizando um algoritmo heurístico e programação dinâmica em dois módulos distintos: o primeiro módulo utiliza um algoritmo heurístico que identifica os cortes potenciais; o segundo utiliza um algoritmo com base na programação dinâmica, que determina a combinação ótima de produtos, com o objetivo de maximizar o valor. Os autores ressaltam que:

A maneira como é conduzido o traçamento das árvores obtidas na colheita ou corte raso é fundamental para estabelecer as quantidades de cada um dos diferentes tipos de produtos que podem ser obtidos da floresta. Porém, esta tarefa é executada quase exclusivamente pelo motosserrista, com base na sua intuição, o que pode comprometer a rentabilidade do negócio florestal. (Arce, MacDonagh e Friedl, 2004, p. 207).

Em sua dissertação de mestrado, Souza (2004) desenvolveu um modelo de Algoritmo Genético de modo a permitir que os tomadores de decisão pudessem determinar o período de intervenção das frentes de corte nos talhões e o fluxo de madeira entre os talhões e as fábricas, minimizando custo de atividades relacionadas às colheitas e ao transporte principal de madeira. O autor, que obteve acesso a dados fornecidos pela empresa KLABIN S.A., desenvolveu oito variedades de Algoritmos Genéticos e comparou os resultados obtidos com a solução de um modelo de Programação Linear Inteira Mista. Foram consideradas restrições de demanda e oferta de cada produto florestal, restrições de produtividade por frente de corte, restrições de volume de madeira cortada e a capacidade de transporte dos produtos florestais e restrições que regulam o controle de estoque (Mínimo, Máximo e Corrente).

Outro trabalho de grande relevância é a tese de Mitchell (2004), apresentada na Escola de Engenharia de Produção da Universidade de Auckland, Nova Zelândia. Nesta tese, o autor apresenta um modelo matemático que busca otimizar o Planejamento Operacional Florestal focando no agendamento da colheita da madeira. Segundo o autor, uma das etapas mais complexas no planejamento operacional é o agendamento das frentes de corte. Para subsidiar este processo foram desenvolvidas soluções conhecidas como OHS (*Operational Harvesting Scheduling*). Ele frisa que um bom OHS atenderá às demandas colhendo

os talhões mais próximos dos centros consumidores e que a solução de um OHS completo deve produzir, no mínimo, as seguintes respostas:

- a) As agendas para as equipes de colheita por unidade de tempo;
- b) Os volumes e os produtos que serão produzidos em cada período;
- c) Como a produção será alocada para os clientes.

O autor também destaca que as estimativas de produção para um talhão podem ser geradas através de três formas:

- a) Informações de produção de um talhão similar;
- b) Estimativas de produção por produto, geradas por um inventário que considera a qualidade dos fustes;
- c) Sistemas computacionais que simulam o processamento das árvores e geram estimativas por classe diamétrica.

Os autores Malinovski et al. (2006) apresentaram um trabalho de análise das variáveis que podem influenciar na produtividade das frentes de corte. Neste trabalho, os autores buscaram identificar e sugerir as principais variáveis físicas do terreno, do povoamento e do planejamento que podem influenciar na produtividade. Eles identificaram, também, os principais tipos de máquinas utilizadas na atividade florestal no Brasil e buscaram correlações entre cada máquina e as variáveis apresentadas. Na aceção dos autores:

Uma adequada predição da produtividade é de suma importância para que sejam realizados orçamentos adequados para as atividades de colheita de madeira nas empresas, bem como estudos para a viabilização de novos sistemas a serem implantados e dimensionamento das máquinas que serão alocadas para cada projeto.

[...] A produtividade de determinada operação é função das variáveis externas (características do sítio) e das variáveis das máquinas. (MALINOVSKI et al, 2006, p.169 e 170).

É importante ressaltar que os autores identificaram 37 variáveis de influência na produtividade das frentes de corte e os 10 tipos de máquinas mais utilizados na produção florestal brasileira. Fizeram a

correlação entre estas variáveis e as diferentes máquinas. Ao final do trabalho eles esclarecem que “a interação entre as variáveis de influência de produtividade e as máquinas refletem a complexidade da atividade de planejamento e dimensionamentos das atividades de colheita de madeira” (MALINOVSKI et al., 2006).

Em Marques et al. (2008), pesquisadores portugueses, em conjunto com mais dois pesquisadores, um espanhol e um turco, apresentaram o resultado de uma pesquisa iniciada em 2006, fruto de uma parceria entre instituições de ensino e empresas privadas portuguesas, na qual desenvolveram o SADPOF (Sistemas de Apoio à Decisão em Planejamento Operacional Florestal). Nesta pesquisa, elaborou-se um protótipo do sistema de apoio à decisão, baseado em *Simulated Annealing* com uma heurística de geração de soluções, para otimizar o planejamento da exploração e transporte de eucalipto para centrais de transformação (clientes). Contudo, o sistema foi pensado para, também, apoiar outros problemas operacionais como a seleção de fornecedores e outras espécies florestais. O sistema desenvolvido permite a identificação do mês de corte de talhões e quantifica os fluxos de madeira de cada talhão, para os centros de transformação, por período de planejamento. Porém, o trabalho não apresenta as características das frentes de corte utilizadas na colheita.

Em 2007, Weintraub et al. (2007) publicaram uma obra que apresenta 32 artigos, organizados como capítulos, que discutem aplicações de Pesquisa Operacional no tratamento de recursos naturais. Estes artigos foram divididos em quatro áreas: Agricultura (8 artigos); Pesca (7 artigos); Florestal (13 artigos); Mineração (4 artigos). Na área florestal os artigos envolvem os diversos aspectos do planejamento florestal (níveis hierárquicos, transporte de produtos, conservação ambiental, etc.). Dentre estes artigos, pode-se destacar o capítulo 18 onde Epstein et al. (2007) apresentam uma discussão sobre as diferentes aplicações de Pesquisa Operacional no planejamento operacional da colheita florestal. Os autores citam possibilidades de aplicações na colheita e carregamento de produtos, na alocação de equipamentos, na integração da colheita com o transporte, na conservação de estradas, na

operação global de colheita e na cadeia de suprimentos do planejamento operacional florestal.

Em Gomide, Arce e Silva (2009), os autores apresentam um estudo comparativo entre os operadores de seleção de Algoritmos Genéticos (roleta, torneio, elitista e bi-classista) no planejamento florestal de um modelo do Tipo I de Johnson e Scheurman (1977). Ficou demonstrado que o operador de seleção roleta apresentou o melhor desempenho, com desvio percentual em relação à solução ótima de apenas 0,90%.

Em Banhara et al. (2010), os autores objetivaram aprimorar as técnicas de planejamento operacional da colheita de eucalipto utilizando um modelo de Programação Linear Inteira Mista e Programação por Metas (*Goal Programming*) sob restrições operacionais, espaciais e ambientais. Inicialmente, os autores resolveram o problema proposto sem nenhuma das restrições, depois adicionaram uma restrição apenas, combinaram duas a duas e por fim modelaram com as três simultaneamente, produzindo 8 cenários diferentes. Os autores não apresentaram colheita de multiprodutos, nem consideraram diversos clientes com demandas diferentes. Outro ponto negligenciado pelos autores do trabalho foi o custo com o transporte da madeira.

No ano de 2012, os autores Barros Junior et al. (2012) apresentaram no SBPO (Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional) um trabalho que visa comparar o desempenho de quatro heurísticas na otimização do problema de planejamento florestal estratégico. As heurísticas testadas foram: Algoritmo Genético, GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), *Simulated Annealing* e ILS (*Iterated Local Search*). O objetivo, em todas as heurísticas testadas, era maximizar o Valor Presente Líquido (VPL). No final do trabalho, os autores apresentam uma tabela com os valores médios de VPL para cada um dos 10 problemas distintos testados. Esta tabela mostra que o Algoritmo Genético atingiu o melhor resultado médio em todos os problemas, enquanto que o *Simulated Annealing* ficou em segundo lugar, também em todos os problemas.

Em sua tese de doutorado, Santana (2013), apresenta uma metodologia para o traçamento e a alocação de toras de eucalipto com a utilização de técnicas de Geração de Colunas e Programação Dinâmica. Neste trabalho, o autor faz a seguinte citação:

Na maioria das empresas florestais brasileiras, os problemas de agendamento operacional de colheita são solucionados por profissionais experientes e dinâmicos que atuam na área de abastecimento de madeira. Tipicamente, algumas premissas e planilhas de apoio são usadas para elaborar a programação operacional por período e por meio de tentativa e erro os profissionais buscam atender aos pedidos dos clientes. (SANTANA, 2013, p.4).

Ao final do trabalho, o autor afirma que a abordagem proposta foi eficiente, pois encontrou soluções ótimas em menos de 5 minutos em oito cenários estudados. Segundo ele, a quantidade de árvores derrubadas para atender determinada carteira de pedidos foi minimizada, gerando menor desperdício.

O trabalho de Borges, Eid e Bergseng (2014) apresenta uma proposta de aplicação de *Simulated Annealing* na busca de vizinhanças em problemas de planejamento florestal. Os autores reforçam que restrições de adjacências são importantes no planejamento florestal a longo prazo. O objetivo do trabalho foi mostrar a performance do *Simulated Annealing*, em três diferentes métodos, para introduzir um *bias* na seleção de talhões a fim de compor a vizinhança em comparação ao método convencional que assume probabilidade uniforme para tal seleção. Eles concluíram que a introdução do *bias* melhorou as soluções em comparação ao método convencional em problemas de planejamento florestal com restrições de adjacências.

No mesmo ano, no trabalho de Marques et al. (2014), os autores exibem uma combinação de técnicas de otimização, para problemas de planejamento florestal tático e operacional, com ferramentas de simulação de eventos discretos (DES – *discrete-event simulation*). Os autores sugerem que determinadas situações do planejamento florestal estão sujeitas a incertezas que podem afetar o planejamento de outras partes da cadeia de valor. Eles ressaltam que, geralmente, os

planejamentos são realizados sem considerar o impacto de fatores estocásticos como atrasos, tempos variáveis de execução de tarefas, diferença de performance das equipes, etc. na execução das operações. Desta forma, eles propõem a utilização desta ferramenta DES para avaliar mudanças de estado no planejamento quando algum evento relevante ocorrer. Os autores citam que assim são capazes de determinar os gargalos do planejamento e refazê-lo, a partir destes, em tempos computacionais aceitáveis.

No trabalho de Vopenka, Kaspar e Marusak (2015) os autores apresentaram uma ferramenta GIS (*Geographic Information System*) combinada com um solver de problemas de programação linear inteira mista. Os autores abordaram dois pontos importantes do agendamento da colheita florestal: o espaço e o tempo. O espaço foi abordado de forma a seguir restrições espaciais para a determinação dos talhões, ou seja, pertinente à divisão da floresta em talhões. O tempo foi abordado de modo a conseguir atender as demandas florestais com qualidade mantendo fontes de colheita suficientes para o futuro. Os autores aplicaram a metodologia proposta num cenário florestal da República Checa e concluíram que a ferramenta apresentada é capaz de planejar a melhor escala de disponibilidade de talhões para a colheita, levando em conta tais aspectos espaciais e temporais.

No mesmo ano, Wei e Murray (2015) apresentaram um trabalho que mostra novos modelos de otimização que buscam introduzir incertezas referentes às restrições espaciais no agendamento da colheita. Segundo os autores, as restrições espaciais são relevantes para garantir a viabilidade dos recursos florestais a longo prazo e geralmente se concentram nas questões que envolvem o tamanho dos talhões, intervalos de vegetação não colhida e proximidade de áreas de trabalho. De acordo com os autores, deixar de incluir incertezas nos modelos podem levar a falhas de otimização que podem apresentar respostas sub otimizadas, ineficazes ou tendenciosas. Os modelos propostos foram aplicados em florestas do norte da Califórnia (EUA) e os autores apontam que seus resultados obtiveram impactos significantes no planejamento florestal.

No mesmo periódico, Veliz et al. (2015) publicaram um artigo tratando de modelos de otimização estocástico, para o planejamento florestal tático, com uma abordagem que utiliza o algoritmo *Progressive Hedging*. Eles utilizaram esta abordagem para buscar a otimização da integração de decisões sobre a colheita e sobre a construção de estradas com a presença de incertezas, modelando esta situação como um problema multiestágio. O algoritmo *Progressive Hedging* é baseado na separação do problema em cenários, eliminando determinadas restrições. O algoritmo busca equalizar as variáveis destes cenários penalizando desvios em relação à média de todos os cenários. A proposta dos autores foi aplicada a 17 diferentes florestas com um horizonte de planejamento de 3 anos, considerando apenas uma espécie de madeira plantada, um tipo de estrada para construir e desconsiderando centros de estoque de madeira. Os autores incorporaram ao modelo as incertezas relativas a questões de mercado (precificação dos produtos) e questões naturais de crescimento da floresta.

Rönnqvist et al. (2015), no mesmo ano, publicaram um trabalho bastante completo, mencionado nesta tese no capítulo 2, quando da descrição do problema proposto. Os autores apresentaram a atual situação acadêmica das pesquisas que envolvem aplicações de Pesquisa Operacional na área florestal. Eles ressaltam que ao longo dos anos a relação entre Pesquisa Operacional e a área florestal se apresentou muito próspera. A área florestal apresentou uma grande quantidade de problemas para a comunidade de Pesquisa Operacional e, em contrapartida, os pesquisadores produziram muitos modelos e métodos para serem utilizados na área. Porém, os autores deste trabalho identificaram 33 problemas que ainda podem ser colocados como desafios para os pesquisadores ou como questões da área florestal que ainda estão em aberto.

Estes problemas foram classificados em nove grupos distintos: planejamento operacional da colheita (P.1 – P.5); planejamento do transporte e roteirização (P.6 – P.9); planejamento florestal tático (P.10 e P.11); preocupações espaciais e ambientais (P.12 e P.13);

planejamento florestal estratégico (P.14 – P.16); conservação da vida selvagem (P.17 – P.19); gestão de combate a incêndios (P.20 – P.22); gestão da cadeia de valor (P.23 – P.25); desafios metodológicos (programação estocástica P.26 e P.27, otimização robusta P.28 e P.29, planejamento hierárquico P.30 e P.31, planejamento multicritério P.32 e P.33).

Abaixo encontram-se discriminados os 33 problemas descritos pelos autores:

- P.1 - Como resolver o problema de alocação de equipamentos com uma formulação exata para instâncias de larga escala?
- P.2 - Como modelar e resolver de forma integrada o agendamento, diário ou semanal, da colheita florestal e as decisões acerca do transporte da madeira? (**Problema abordado nesta tese**)
- P.3 - Como estabelecer os impactos ambientais das diferentes práticas de colheita e definir modelos de modo a evitar quaisquer impactos negativos?
- P.4 - Como sincronizar as decisões referentes à classificação operacional, à colheita e ao transporte para problemas florestais de grande tamanho?
- P.5 - Como utilizar a precificação como um mecanismo de coordenação de operações florestais?
- P.6 - Como modelar e propor princípios eficientes de compartilhamento para colaboração prática no transporte?
- P.7 - Como modelar e resolver uma formulação exata de um problema de roteirização de veículos na área florestal?
- P.8 - Como desenvolver modelos e métodos para o problema de roteirização de veículos na área florestal relacionados com planejamento em tempo real e incluindo filas nos pontos de carregamento e descarregamento?
- P.9 - Como desenvolver modelos e métodos para o problema de roteirização de veículos na área florestal que tratem da sincronização entre caminhões e equipamento de carregamento (*loaders*)?

- P.10 - Como desenvolver uma metodologia para coordenar e sincronizar um conjunto de equipes com agendas individuais?
- P.11 - Como modelar e resolver problemas que integrem a colheita, o transporte e a construção de estradas em floresta de larga escala considerando restrições espaciais e ambientais?
- P.12 - Como desenvolver modelos e métodos exatos para problemas ARM (*Area Restriction Model*) de larga escala envolvendo milhares de células e muitos períodos de tempo, em conjunto com as decisões de construção de estradas e manutenção?
- P.13 - Como incluir considerações ambientais complexas como fragmentação, corredores ambientais, equilíbrios de partes maduras, etc. em formulações de URM (*Unit Restriction Model*) e ARM com um modo computacional factível?
- P.14 - Como avaliar, explícita e rigorosamente, e introduzir graus de incerteza em modelos estratégicos, e como resolver estes modelos?
- P.15 - Como incorporar diferentes questões ambientais e de sustentabilidade nos modelos existentes e resolver tais modelos?
- P.16 - Como visualizar e modelar o planejamento florestal estratégico abrangendo toda a cadeia de suprimentos, com múltiplas partes independentes ao longo da cadeia? Como avaliar e equilibrar esta situação?
- P.17 - Como desenvolver formulações efetivas e métodos de solução para seleção de reserva dinâmica e problemas de design com feedbacks sobre a precificação de terras e incertezas sobre a disponibilidade e qualidade do local e sobre o orçamento?
- P.18 - Como incorporar modelos demográficos estocásticos de viabilidade de população de vida selvagem nos problemas de seleção de reservas?
- P.19 - Como incorporar modelos econômicos e sociais de escolhas de localização de moradia em modelos de seleção de reserva

dinâmica a fim de maximizar o bem-estar das famílias e a conservação da biodiversidade?

- P.20 - Como desenvolver modelos fáceis para auxiliar a determinar quando e onde implementar o tratamento de combustíveis em florestas altamente inflamáveis e cenários florestais?
- P.21 - Como desenvolver modelos espaciais de filas dependentes de tempo que possam ser associados com modelos de otimização fáceis para auxiliar a determinar a melhor maneira de dispor aviões de combate a incêndio (*airtankers*) no início de cada dia e como realocá-los no decorrer do dia?
- P.22 - Como desenvolver sistemas de suporte à decisão na gestão de combate a grandes incêndios de modo a auxiliar a determinar a melhor maneira de gerir os que escaparam do primeiro ataque e que podem causar situações de perigo significantes para pessoas, propriedades e recursos florestais, enquanto se busca aprimorar processos do ecossistema natural com incertezas?
- P.23 - Como desenvolver uma estrutura de planejamento integrado para uma cadeia de valor com demandas orientadas caracterizada por uma sequência de processos divergentes?
- P.24 - Como conceber os mecanismos de coordenação necessários para integrar e sincronizar as unidades com a cadeia de valores da floresta?
- P.25 - Como resolver problemas de planejamento multiestágios, multiobjetivos e estocásticos em larga escala?
- P.26 - Como representar incertezas através de cenários de problema florestal estratégico, tático e operacional de modo que incertezas estruturais sejam bem representadas em modelos que podem ser resolvidos?
- P.27 - Como expressar incertezas para problemas grandes, inteiros misto e multiestágios onde as incertezas estão presentes em múltiplas formas como incêndios, precificação e meio ambiente, de modo que tais incertezas sejam bem representadas em modelos que podem ser resolvidos?

- P.28 - Como modelar corretamente a incerteza em otimização robusta?
- P.29 - Como utilizar a otimização robusta na prática para problemas grandes de planejamento florestal inteiro misto?
- P.30 - Como implementar modelos de decisão consistentes em uma estrutura hierárquica?
- P.31 - Como desenvolver processos de agregação e desagregação quando os modelos de problemas inteiro misto são utilizados em planejamento hierárquico?
- P.32 - Como incorporar as preferências do gestor para diferentes critérios num modelo multicritério?
- P.33 - Como desenvolver abordagens multicritério que incorporem completa e rigorosamente as preferências do gestor de forma fácil para o usuário? (RÖNNQVIST et al., 2015, tradução nossa)

No trabalho de Augustynczyk, Arce e Silva (2017) os autores propõem o planejamento florestal otimizado, incluindo restrições de adjacências, para formar blocos de colheita seguindo um limite mínimo de área. Tal procedimento foi realizado com duas abordagens distintas. A primeira envolveu restrições denominadas *ring inequalities* e a segunda foi baseada em formação de áreas de floresta madura. A proposta foi implementada para uma floresta no Brasil com 236 talhões de três espécies diferentes plantadas. As duas abordagens se mostraram capazes de realizar o agrupamento, respeitando as restrições apresentadas. Em geral, a primeira abordagem se mostrou mais eficiente por gerar uma quantidade menor de restrições ao problema e alcançou melhores resultados em termos de valor presente líquido.

Outro trabalho importante do mesmo ano é o artigo onde Bettinger e Boston (2017) propõem a discussão acerca de trabalhos futuros, na área florestal, que podem ser desenvolvidos utilizando heurísticas. Os autores baseiam estas propostas em suas próprias experiências ao longo dos anos de estudo sobre o planejamento florestal e o uso de ferramentas de Pesquisa Operacional para desenvolver tais estudos.

Eles apresentam propostas de trabalhos futuros em seis diferentes áreas do planejamento florestal, são elas:

- a) Melhorias nos processos das metaheurísticas;
- b) Estratégias de busca por reversão;
- c) Estratégias de busca por destruição e reconstrução (estratégias de reparo);
- d) Parametrização inteligente e dinâmica do processo de busca;
- e) Critérios inteligentes de conclusão ou integração para o processo de busca;
- f) Iniciar a busca a partir de uma solução de alta qualidade.

De acordo com a opinião dos autores, todas estas áreas possuem potencial para aprimorar a capacidade e eficiência das abordagens heurísticas, quando aplicadas a problemas da gestão florestal. Eles apresentaram esta mesma opinião no congresso da *International Union of Forest Research Organizations*, em Freiburg, na Alemanha. Naquela oportunidade, concluíram a apresentação com três importantes questionamentos:

- “Nós devemos continuar?” – uma reflexão sobre a resposta que pode surgir através da exploração de métodos matemáticos alternativos para resolver problemas complexos;
- “Para onde vamos?” – uma reflexão de quais poderiam ser as inovações no sentido de buscar métodos mais eficazes, como a integração entre heurísticas de aprendizagem e métodos de inteligência artificial;
- “Qual é o benefício?” – uma reflexão sobre os benefícios alcançados atualmente, através do uso de heurísticas, no planejamento florestal e uma projeção sobre os futuros benefícios que poderão ser alcançados.

Também em 2017, Grazhdani (2017) apresentou no *1st International Conference on Social and Natural Sciences* a descrição de um estudo de caso da aplicação de uma abordagem participativa no planejamento florestal multicritério. A autora discorre sobre a

participação dos diversos atores do cenário de decisão em planejamento florestal estratégico, visando não apenas os objetivos comerciais da floresta, mas também aspectos sociais e ambientais. A autora desenvolveu o estudo na região chamada de *Lakes Prespa*, na divisa de três países do sudeste europeu (Albânia, Grécia e Macedônia). Ela propôs o planejamento participativo através de organizações governamentais e não-governamentais, utilizou técnicas de análise de decisão multicritério e realizou a otimização do planejamento através dos métodos Programação Estendida por Objetivos (*Extended Goal Programming – EGP*) e Processo Hierárquico Analítico (*Analytical Hierarchy Process – AHP*). A autora concluiu que tal proposta de planejamento participativo tende a evitar decisões arbitrárias ou manipulativas.

Uma proposta interessante de integração foi apresentada por Quintero-Méndez e Jerez-Rico(2017). Os autores sugerem uma proposta de integração no planejamento florestal de forma a otimizar a colheita florestal e o comércio de créditos de carbono. A proposta foi aplicada em florestas de teca em países da América Latina, mas pode ser adaptada para outras espécies de florestas. Os autores partiram de uma solução não-ótima para o regime de desbaste dos talhões, obtida através da simulação sobre o crescimento e rendimento dos talhões, utilizando Algoritmos Genéticos. Com esta solução, buscaram otimizar o planejamento do agendamento da colheita de toda a floresta buscando maximizar, simultaneamente, o valor presente líquido do comércio dos produtos florestais e dos créditos de carbono. As análises apresentadas demonstram que o modelo proposto é sensível às variações na taxa de crescimento dos talhões, nos preços do carbono e dos produtos florestais, na produtividade e nos custos de colheita e transporte. Foi apresentado um modelo de estrutura modular que permite a calibragem a partir de dados que o gestor possua a respeito da floresta.

No trabalho de Haara et al. (2018) são discutidas abordagens que envolvem técnicas de visualização de dados, de forma interativa, para orientar a aprendizagem e a tomada de decisão em processos de planejamento florestal e problemas de decisão multidimensionais. Os

autores propuseram 14 técnicas de visualização interativa dos dados para o suporte a essas decisões. A estrutura de planejamento aplicada neste estudo inclui três níveis conectados a diferentes conjuntos de dados. O primeiro nível inclui dados a respeito da estrutura dos talhões da floresta e as decisões envolvidas com esta estrutura. O segundo também inclui os dados da estrutura dos talhões, mas direcionados a dados mais elaborados como o calendário de tratamento dos talhões florestais. O terceiro nível inclui dados a respeito de arrendamento de terras e expansão estratégica. Os autores concluíram que não há uma técnica que apresente maior eficiência que as demais em todos os níveis, mas sugerem que a escolha da técnica de visualização deve ser feita de acordo com as preferências e habilidades do gestor e da disponibilidade destas técnicas.

Também neste ano, Dong et al. (2018) apresentaram um trabalho que busca discutir a quantidade de testes independentes que devem ser realizados quando se busca validar uma estratégia de planejamento da colheita florestal com restrições espaciais com heurísticas. Este artigo foi, especialmente, voltado à discussão em torno do uso da heurística *Simulated Annealing* em três tipos de problemas de planejamento da colheita florestal: o modelo não-espacial, o modelo com restrição de área (*Area Restriction Model – ARM*) e o modelo com restrição de unidades (*Unit Restriction Model – URM*). Os autores utilizaram a heurística citada para realizar a determinação da vizinhança e atender as restrições espaciais impostas em três diferentes versões. Eles mostraram que o número de testes independentes realizados têm influência direta sobre a performance das diferentes técnicas utilizadas para a heurística. Os resultados demonstram que a quantidade ótima de testes independentes para o modelo ARM, para todas as técnicas utilizadas para a heurística, pode ser estimada utilizando uma função logarítmica negativa. Porém, para os outros dois modelos os autores propõem que a quantidade ideal gira em torno de 250 testes independentes.

3.3 SIMULATED ANNEALING

Como o próprio nome propõe, a metaheurística conhecida como *Simulated Annealing* (recozimento ou têmpera simulada) simula o processo de recozimento de metais ou cristais. Rodrigues (2000) define este processo como “um processo térmico utilizado para obtenção de estados de baixa energia em um sólido”. O recozimento consiste, basicamente, em duas fases. Inicialmente o material é aquecido até atingir a fusão para então, na segunda fase, ser resfriado lentamente até voltar ao estado sólido. Se o resfriamento for feito de forma rápida, ele conduz a produtos metaestáveis. Enquanto que, se ele for feito de forma lenta, irá conduzir a produtos estáveis, com menor energia interna e mais resistentes. Por isso, o resfriamento deve ser feito de forma lenta, para que a estrutura atômica do material se organize de forma uniforme com mínima energia.

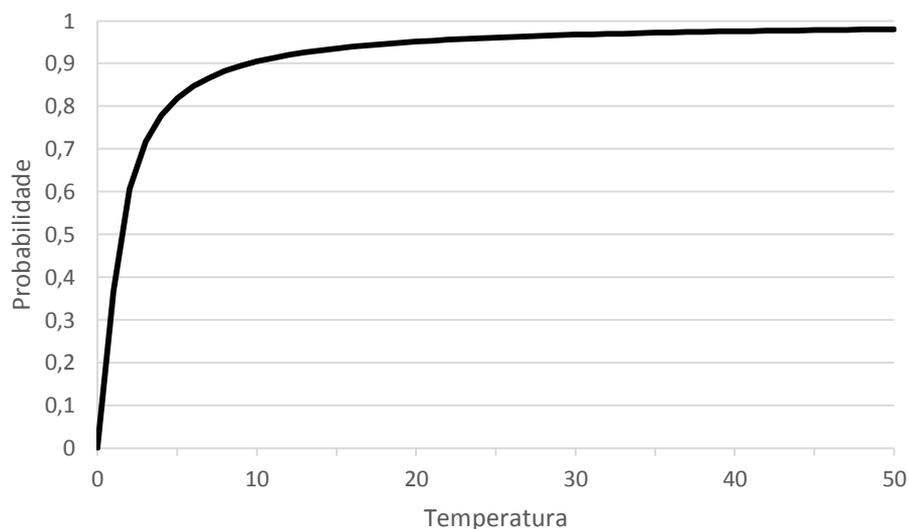
Mazzucco (1999), define que o processo do recozimento, visto através de uma ótica computacional, como “um processo estocástico de determinação de uma organização de átomos de um sólido, que apresente energia mínima”. Enquanto o material tiver uma temperatura alta os átomos terão grande probabilidade de se mover para posições que aumentem a energia total. Porém, à medida que a temperatura diminui, os átomos passam a se mover menos, diminuindo a probabilidade de o átomo passar a uma posição que aumente a energia total.

O início da simulação computacional deste processo de recozimento se dá com o trabalho de Metropolis et al. (1953). Neste trabalho, os autores desenvolveram um método baseado em métodos de Monte Carlo e que gerava uma sequência de estados de um material. Inicialmente este material estava em estado i , com energia E_i , e um estado subsequente j era gerado através de uma pequena perturbação. Este novo estado possui energia E_j sendo que, caso $E_j \leq E_i$, então o estado j é aceito como subsequente, caso contrário o estado j será aceito de acordo com uma probabilidade p dada pela Equação 17 abaixo.

$$p = \exp\left(\frac{E_i - E_j}{k_B \cdot T}\right) \quad (17)$$

Nesta equação, T representa a temperatura atual do material e k_B é a constante de Boltzmann. Esta regra é conhecida como Critério de Metropolis e o algoritmo desenvolvido também recebeu o nome do autor. A Figura 6 ilustra a relação entre a temperatura e a probabilidade de aceitação de uma nova solução. Percebe-se que quanto maior for a temperatura, maior será a probabilidade de aceitação de um novo estado.

FIGURA 6 – RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E A PROBABILIDADE DE ACEITAÇÃO DE UM NOVO ESTADO DE ENERGIA.



FONTE: O Autor (2018)

Apesar do trabalho de Metropolis ter sido publicado em 1953, foi apenas na década de 80, com o trabalho de Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983), que a ideia de aplicar o método para resolver problemas de otimização combinatorial surgiu e foi nomeado como Algoritmo *Simulated Annealing*. Neste trabalho, os autores fizeram adaptações ao algoritmo desenvolvido por Metropolis, com a finalidade de aplicá-lo a problemas de otimização combinatorial. Uma das adaptações envolve o critério de aceite que foi então formulado como uma função de aceite $P_{C_k}(j)$, definida pela Equação 18 abaixo.

$$P_{c_k}(j) = \begin{cases} 1 & \text{se } g(j) \leq g(i) \\ \exp\left(\frac{-[g(j) - g(i)]}{c_k}\right) & \text{se } g(j) > g(i) \end{cases} \quad (18)$$

Nesta equação, g é a função a ser minimizada (semelhantemente à energia, no caso do recozimento do material), i e j são as soluções atual e candidata, respectivamente, e c_k é um parâmetro que representa a temperatura T .

Segundo Lee (1995), o *Simulated Annealing* pode ser classificado como um método de busca local. Esta classe requer a definição de uma vizinhança e um método de avaliação de custo da solução. Porém, Corrêa (2000) reforça que este método de busca local é ineficiente para evitar ótimos locais, ou seja, é uma heurística pobre para a maioria dos problemas de otimização combinatorial, já que um requisito desejável a qualquer algoritmo de otimização é o de encontrar boas soluções, independentemente da solução inicial utilizada.

Alguns autores propõem que um método para evitar ótimos locais seria executar a busca local a partir de diversos pontos de partida, com soluções iniciais distintas, e então tomar como solução final a melhor encontrada. Porém, para problemas de alta complexidade, apresenta-se a discussão sobre quantas iterações seriam suficientes para se encontrar uma boa solução, inviabilizando a utilização deste método, segundo Araújo (2001).

No trabalho de Hiroyasu, Miki e Ogura (2000) os autores frisam que o *Simulated Annealing* não sofre com a dificuldade de ficar estagnado num ótimo local, já que aceita, de acordo com certa probabilidade, que a solução evolua para um estágio pior do que o atual. Outra definição importante é que a temperatura inicial T deve ser relativamente alta, de forma a evitar uma convergência precoce do algoritmo para um ótimo local.

A partir da compreensão de que o espaço de soluções E cresce exponencialmente de acordo com a magnitude do problema, o tempo de execução do algoritmo pode torná-lo inviável. O trabalho de Hajek (1988) apresenta um resultado importante para este caso pois, não apenas as

condições necessárias para a convergência assintótica do algoritmo são fornecidas, mas também o número de iterações necessárias para que essa convergência ocorra.

4 METODOLOGIA

4.1 MODELO MATEMÁTICO

Com o intuito de resolver o problema apresentado nesta tese, foi, primeiramente, desenvolvido um modelo de PLIM. Como já abordado pela revisão bibliográfica, não foi encontrada na literatura nenhuma referência que apresente um modelo matemático capaz de abranger todas as características que se deseja observar nesta tese. Descreve-se a seguir o modelo proposto.

QUADRO 2 – PARÂMETROS UNIDIMENSIONAIS DO MODELO EXATO.

Parâmetro	Descrição
T	Conjunto de talhões disponíveis.
F	Conjunto de frentes de corte.
P	Conjunto de produtos que podem ser produzidos.
C	Conjunto de centros de demanda.
HP	Horizonte de Planejamento.
ω	Custo de transporte do produto florestal.

FONTE: O Autor (2018)

Com base nestes parâmetros, índices são utilizados em outros parâmetros e variáveis.

QUADRO 3 – ÍNDICES DO MODELO EXATO.

Índice	Descrição
t	Representa um talhão pertencente a T .
f	Representa uma frente de corte pertencente a F .
p	Representa um produto pertencente a P .
c	Representa um centro de demanda pertencente a C .
δ	Representa um dia do horizonte de planejamento $dI \leq HP$.
d	Representa um dia de colheita.

FONTE: O Autor (2018)

Novos parâmetros multidimensionais são necessários, são eles:

QUADRO 4 – PARÂMETROS MULTIDIMENSIONAIS DO MODELO EXATO.

Parâmetro	Descrição
μ_f	Custo de movimentação da frente f .
φ_f	Custo de operação da frente f .
$\tau_{t,f}$	Tempo necessário para a frente f colher o talhão t .
$Tmax$	Maior prazo em que é possível realizar a colheita. Tal prazo é estipulado considerando como se a frente f iniciasse a colheita do talhão t no último dia do horizonte de planejamento, sendo f e t os responsáveis pelo valor máximo de $Tempo_Colheita_{t,f}$.
ρ_{t_1,t_2}	Distância entre os talhões t_1 e t_2 .
$\pi_{t,c}$	Distância entre o talhão t e o centro de demanda c .
$\lambda_{c,p,\delta}$	Demanda diária pelo produto p no centro de demanda c .
$A_{t,f,\delta,d}$	Área do talhão t que a frente f poderá colher no dia d se iniciar a colheita do mesmo no dia δ .
$\theta_{t,f,\delta,p,d}$	Oferta de produto p no talhão t que a frente f poderá colher no dia d se iniciar a colheita do mesmo no dia δ .

FONTE: O Autor (2018)

Todas estas informações formam o rol de constantes do problema que se deseja modelar. Desta forma, todos os cálculos que são necessários para a determinação dos valores destas constantes são realizados previamente com base no cenário florestal abordado.

Para a construção do modelo se faz necessário, também, determinar alguns conjuntos de variáveis que serão utilizadas neste.

QUADRO 5 – VARIÁVEIS DO MODELO EXATO.

Variável	Tipo	Descrição
$y_{f,t,\delta}$	Binária	Vale 1 se a frente f inicia a colheita do talhão t no dia δ , caso contrário vale 0.
$x_{f,t,d}$	Binária	Vale 1 se a frente f está colhendo o talhão t no dia d , com $1 \leq d \leq T_{max}$, caso contrário vale 0.
$\Delta_{f,t_1,t_2,\delta}$	Binária	Vale 1 se a frente f se movimentou do talhão t_1 para o talhão t_2 no dia δ , caso contrário vale 0.
$\kappa_{f,t,d}$	Contínua	Área colhida pela frente f no talhão t no dia d .
$\sigma_{p,t,f,d}$	Contínua	Quantidade de produto p colhido pela frente f no talhão t no dia d .
$\varepsilon_{t,p,c,\delta}$	Contínua	Quantidade de produto p transportado do talhão t para o centro de demanda c no dia δ .
ψ_f	Contínua	Distância total percorrida pela frente f .

FONTE: O Autor (2018)

Utilizando as constantes e as variáveis apresentadas, construiu-se o modelo matemático a seguir, com sua função objetivo e suas restrições.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } F = & \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{\delta=1}^{HP} (\varepsilon_{t,p,c,\delta} \cdot \pi_{t,c} \cdot \omega) + \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \sum_{d=1}^{T_{max}} (\kappa_{f,t,d} \cdot \varphi_f) \\
 & + \sum_{f \in F} (\psi_f \cdot \mu_f)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{f \in F} \sum_{\delta=1}^{HP} y_{f,t,\delta} \leq 1 \quad t \in T \tag{2}$$

$$\sum_{t \in T} y_{f,t,1} = 1 \quad f \in F \tag{3}$$

$$x_{f,t,1} = y_{f,t,1} \quad f \in F, t \in T \tag{4}$$

$$\sum_{t \in T} x_{f,t,d} \leq 1 \quad f \in F, 1 \leq d \leq Tmax \quad (5)$$

$$\sum_{f \in F} x_{f,t,d} \leq 1 \quad t \in T, 1 \leq d \leq Tmax \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T} x_{f,t,d} = 1 \quad f \in F, 1 \leq d \leq HP \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{\delta=1}^{HP} (y_{f,t,\delta} \cdot \tau_{t,f}) \leq HP \quad f \in F \quad (8)$$

$$\sum_{d=1}^{Tmax} x_{f,t,d} \leq \tau_{t,f} \quad t \in T, f \in F \quad (9)$$

$$\sum_{d=\delta}^{\delta+\tau_{t,f}-1} x_{f,t,d} \geq y_{f,t,\delta} \cdot \tau_{t,f} \quad \begin{cases} t \in T, f \in F \\ 1 \leq \delta \leq HP \end{cases} \quad (10)$$

$$x_{f,t,d} \geq y_{f,t,\delta} \quad \begin{cases} f \in F, t \in T, 1 \leq \delta \leq HP \\ \delta \leq d \leq (\delta + \tau_{t,f} - 1) \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma_{p,t,f,d} = \sum_{\delta=1}^{HP} (y_{f,t,\delta} \cdot \theta_{t,f,\delta,p,d}) \quad \begin{cases} f \in F, t \in T, p \in P \\ 1 \leq d \leq Tmax \end{cases} \quad (12)$$

$$\kappa_{f,t,d} = \sum_{\delta=1}^{HP} (y_{f,t,\delta} \cdot A_{t,f,\delta,d}) \quad \begin{cases} f \in F, t \in T \\ 1 \leq d \leq Tmax \end{cases} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{t,p,c,\delta} = \sum_{f \in F} \sigma_{p,t,f,d} \quad \begin{cases} t \in T, p \in P, c \in C \\ 1 \leq \delta \leq HP \end{cases} \quad (14)$$

$$\sum_{t \in T} \varepsilon_{t,p,c,\delta} \geq \lambda_{c,p,\delta} \quad \begin{cases} p \in P, c \in C \\ 1 \leq \delta \leq HP \end{cases} \quad (15)$$

$$\Delta_{f,t_1,t_2,\delta} = 0 \quad f \in F, t_1, t_2 \in T \quad (16)$$

$$\Delta_{f,t_1,t_2,\delta} \geq x_{f,t_2,dl} + x_{f,t_1,dl-1} - 1 \quad \begin{cases} f \in F, t_1, t_2 \in T \\ 1 \leq \delta \leq HP \end{cases} \quad (17)$$

$$\psi_f = \sum_{t_1 \in T} \sum_{t_2 \in T} \sum_{\delta=1}^{HP} (\Delta_{f,t_1,t_2,\delta} \cdot \rho_{t_1,t_2}) \quad f \in F \quad (18)$$

$$y_{f,t,\delta} \in \{0, 1\}$$

$$x_{f,t,d} \in \{0, 1\}$$

$$\Delta_{f,t_1,t_2,\delta} \in \{0, 1\}$$

$$\kappa_{f,t,d} \geq 0$$

$$\begin{aligned}\sigma_{p,t,f,d} &\geq 0 \\ \varepsilon_{t,p,c,\delta} &\geq 0 \\ \psi_f &\geq 0\end{aligned}$$

A função objetivo deste modelo pode ser repartida em três partes distintas formadas por somatórios múltiplos. A primeira é responsável por calcular o custo do transporte da madeira colhida para os centros de demanda. A segunda calcula o custo operacional das frentes de corte durante toda a colheita que efetuam. Finalmente, a terceira é responsável por calcular o custo de movimentação das frentes de corte entre os talhões durante o horizonte de planejamento.

Observando as restrições do modelo matemático apresentado, vê-se que as representadas pela inequação 2 garantem que cada talhão seja colhido uma única vez, enquanto as representadas pelas equações 3 e 4 garantem que cada frente inicie a colheita de um único talhão no primeiro dia do horizonte de planejamento.

As restrições evidenciadas pela inequação 5 garantem que cada frente de corte atue num único talhão a cada dia, enquanto as representadas pela inequação 6 garantem que duas frentes não atuem no mesmo talhão. As representadas pela equação 7 e pela inequação 8 garantem que as frentes de corte atuarão em todos os dias do horizonte de planejamento e, por sua vez, as expostas nas inequações 9, 10 e 11 garantem que cada vez que uma frente de corte iniciar a colheita de um talhão, irá atuar neste talhão até concluir a colheita do mesmo.

Observando as equações 12 e 13, vê-se que as restrições por elas representadas são responsáveis por ativar as variáveis $\sigma_{p,t,f,d}$ e $\kappa_{f,t,d}$ de acordo com os talhões que forem selecionados para colheita através da variável $y_{f,t,\delta}$.

A equação 14, juntamente com a inequação 15, representam restrições que garantem que a quantidade de produtos a ser transportada, para os centros de demanda, não exceda a quantidade de produtos colhidos nos talhões e, simultaneamente, seja suficiente para atender as demandas por cada tipo de produto.

Por fim, as restrições representadas pelas equações 16 e 18, além da inequação 17, são responsáveis por ativar a variável $\Delta_{f,t_1,t_2,\delta}$, que descreve a movimentação das frentes de corte entre os talhões e, também, por calcular a distância percorrida por cada frente, representada pela variável ψ_f .

4.2 MÉTODO HEURÍSTICO

Levando em conta a complexidade do problema, demonstrada na seção anterior, sugere-se a utilização de uma metaheurística a fim de buscar soluções para o problema em menor tempo computacional.

Por se tratarem de processos iterativos, é importante comparar o comportamento de diferentes metaheurísticas e escolher a mais apropriada para a solução do problema. Vale salientar que o método proposto envolve a criação de escalas de colheita e a solução do problema de transporte da madeira colhida por esta escala, que se classifica como um problema de transporte esparso. Ou seja, a cada escala de colheita criada, um novo problema de transporte esparso precisa ser resolvido

Esta questão sobre a complexidade do problema e sobre a complexidade envolvida a cada iteração foi discutida, anteriormente, na banca de qualificação desta tese de doutorado. Seguindo orientação da banca, optou-se por utilizar um método baseado na metaheurística *Simulated Annealing* (METROPOLIS et al., 1953; KIRKPATRICK et al., 1983). Tal opção pelo *Simulated Annealing*, ao invés de outras metaheurísticas, se deu pelo fato de que esta metaheurística demanda menor esforço computacional do que outras metaheurísticas, como Algoritmo Genético, por exemplo. Utilizando o *Simulated Annealing*, cria-se uma única escala de colheita a cada iteração, conseqüentemente só é necessário resolver um único problema de transporte esparso por iteração. Por outro lado, o Algoritmo Genético necessita de uma população de soluções a cada iteração, ou seja, é necessário criar um elevado número de diferentes escalas de colheita, o que resulta na

mesma quantidade de problemas de transporte esparsos a serem resolvidos a cada iteração.

O desenvolvimento de um método para otimizar o planejamento florestal no nível operacional apresenta elevada complexidade computacional. Além disso, não existem bancos de dados referentes a florestas reais com o detalhamento necessário para testar e melhorar o método proposto. Atualmente, o recurso mais utilizado para desenvolvimento de pesquisa, nesta área, é a realização acordos com empresas privadas da área florestal, utilizando os dados florestais desta empresa e buscando otimizar a colheita e o transporte da madeira desta situação específica.

Desta forma, foi utilizada uma ferramenta para geração de cenários florestais, com base em dados reais de uma floresta. Esta ferramenta foi apresentada por Santos, Silva e Arce (2016).

4.2.1 Ferramenta de Geração de Cenários Florestais

A ferramenta apresentada no artigo supracitado é capaz de gerar as informações relevantes sobre um cenário florestal. Esta ferramenta gera as informações de maneira aleatória, de acordo com certos parâmetros controlados pelo operador da ferramenta no início do processo. Mais informações sobre o funcionamento da ferramenta podem ser encontradas no artigo de Santos, Silva e Arce (2016).

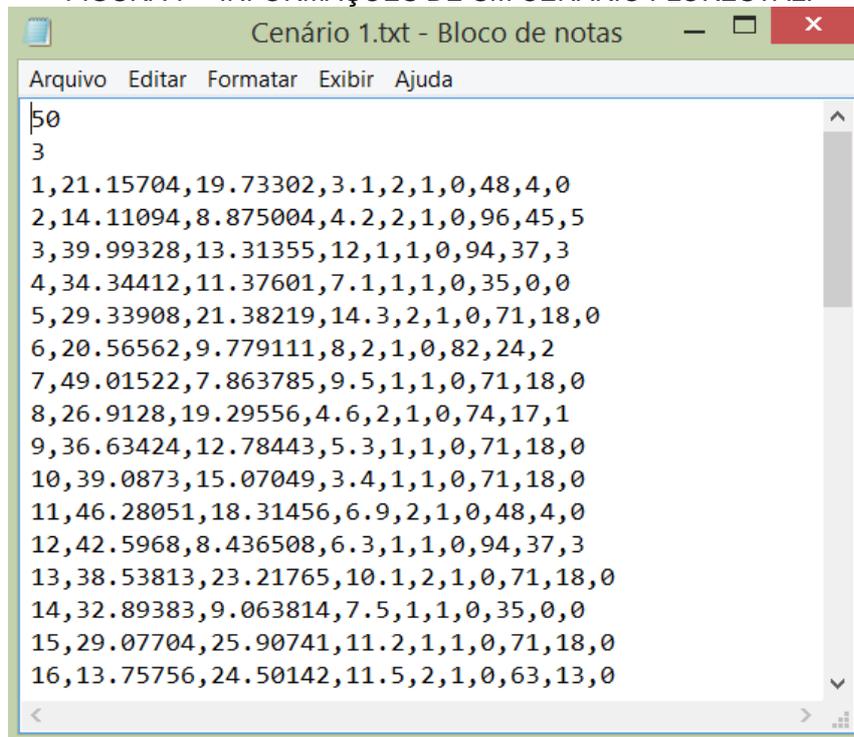
Após a construção do cenário, a ferramenta salva, em um arquivo texto, os dados referentes ao cenário florestal gerado. Cada cenário apresenta as seguintes informações:

- A quantidade de talhões disponíveis para colheita;
- A quantidade de diferentes produtos florestais que podem ser colhidos em cada talhão;
- Para cada talhão: a identificação, as coordenadas, o tamanho, a topografia do terreno, a espécie de árvore plantada, as condições de colheita em temporadas de chuva, o estoque de cada produto florestal que está disponível para colheita neste talhão;

- A quantidade de centros de demanda onde estes produtos deverão ser entregues;
- Para cada centro de demanda: a identificação e as coordenadas do centro.

A Figura 7 apresenta um exemplo de arquivo de texto, gerado pela ferramenta, contendo as informações de um cenário florestal. Pode-se observar que neste cenário existem 50 talhões disponíveis para colheita, com no máximo três tipos de produtos florestais em cada talhão, e as informações específicas dos primeiros 16 talhões.

FIGURA 7 – INFORMAÇÕES DE UM CENÁRIO FLORESTAL.



FONTE: O Autor (2018)

Para o desenvolvimento desta tese foram desenvolvidos 100 cenários florestais, baseados em dados reais de florestas, compartilhados por colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná. Cada cenário contém 50 talhões disponíveis para colheita, até 3 diferentes produtos florestais que podem ser colhidos e 1 centro de demanda para o

recebimento da colheita. Estes cenários foram nomeados como “Cenário 1” a “Cenário 100”.

4.2.2 Método de Otimização

O método proposto inicia com a inserção dos dados do cenário florestal escolhido para a otimização, através da leitura do arquivo texto, e de outros parâmetros iniciais fundamentais para a elaboração do modelo que se deseja otimizar. Estes parâmetros envolvem: o horizonte de planejamento no qual se deseja otimizar a colheita e o transporte dos produtos; as demandas por produtos de cada centro de demanda; os dados referentes ao comportamento das frentes de corte, em especial sua produtividade e os custos de operação e movimentação da frente.

Após a inserção de todos os dados e parâmetros necessários, o sistema estará pronto para iniciar a otimização do modelo florestal proposto. O método inicia a otimização através da geração aleatória de sequências de talhões para serem colhidos por cada uma das frentes de corte. Abaixo, as Equações 19 e 20 apresentam um exemplo para duas frentes de corte.

$$F_1 = \{T_{12}; T_5; T_8\} \quad (19)$$

$$F_2 = \{T_3; T_{22}; T_{11}; T_{30}\} \quad (20)$$

A Equação 19 demonstra que a frente de corte F_1 irá colher os talhões 12, 5 e 8, nesta ordem, enquanto a Equação 20 demonstra que a frente de corte F_2 irá colher os talhões 3, 22, 11 e 30, nesta ordem. É importante ressaltar que a construção aleatória destas sequências obedece ao limite de tempo do horizonte de planejamento e as produtividades de cada frente de corte.

Após a colheita dos talhões, nas sequências apresentadas anteriormente, o problema de planejamento florestal recai num problema de transporte esparso, pois é necessário transportar todos os produtos

colhidos nos talhões para os centros de demanda. O problema de transporte foi resolvido através do método apresentado por Loch (2014).

O custo total do planejamento florestal operacional é composto, então, pelos custos de transporte dos produtos colhidos até os centros de demanda, pelo custo de operação das frentes de corte e pelos custos de movimentação das frentes de corte. Este custo total será a função de avaliação do *Simulated Annealing* e pode ser representado pela Equação 21 abaixo.

$$C = \sum_{p=1}^{\pi} \sum_{t=1}^{\theta} \sum_{d=1}^n \sum_{c=1}^{\beta} \sum_{k=1}^n r_{p,t,d,c,k} \cdot \rho_{p,t,d,c,k} + \sum_{h=1}^{\gamma} \sum_{d=1}^n \sum_{i=1}^{\pi} \sum_{j=1}^{\pi} y_{h,d,i,j} \cdot \lambda_{h,d,i,j} + \sum_{h=1}^{\gamma} \sum_{d=1}^n z_{h,d} \cdot \sigma_{h,d} \quad (21)$$

Esta equação pode ser dividida em três partes: o primeiro somatório múltiplo apresenta o custo de transporte da madeira colhida; o segundo apresenta o custo de movimentação das frentes de corte entre os talhões; e, o terceiro, o custo de operação das frentes de corte durante a colheita. Nesta equação existem três variáveis binárias que podem ser descritas da seguinte forma:

- $r_{p,t,d,c,k} = 1$ se o produto florestal p foi colhido no talhão t no dia d e transportado para o centro de demanda c no dia k , sendo que $\rho_{p,t,d,c,k}$ é o custo deste transporte com os mesmos parâmetros;
- $y_{h,d,i,j} = 1$ se a frente de corte h movimentou-se no dia d do talhão i para o talhão j , sendo que $\lambda_{h,d,i,j}$ é o custo desta movimentação com os mesmos parâmetros;
- $z_{h,d} = 1$ se a frente de corte h operou em colheita no dia d , sendo que $\sigma_{h,d}$ é o custo operacional desta frente de corte para os mesmos parâmetros.

A otimização através da metaheurística *Simulated Annealing* é realizada através de perturbações na solução atual, buscando encontrar uma nova solução. São propostas duas opções de perturbação para o método apresentado. Na primeira opção, um talhão que havia sido escolhido para a sequência de colheita de uma das frentes de corte é substituído por outro que não havia sido escolhido. No exemplo abaixo, a Equação 22 apresenta uma substituição na frente de corte F_1 , onde o talhão 5 é substituído pelo talhão 9, que até então não havia sido selecionado para colheita.

$$\begin{cases} F_1 = \{T_{12}; T_5; T_8\} \\ F_2 = \{T_3; T_{22}; T_{11}; T_{30}\} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_1 = \{T_{12}; T_9; T_8\} \\ F_2 = \{T_3; T_{22}; T_{11}; T_{30}\} \end{cases} \quad (22)$$

A segunda opção de perturbação envolve uma permuta entre dois talhões escolhidos para a sequência de colheita de uma das frentes de corte. Estes dois talhões podem estar na sequência da mesma frente de corte ou de duas frentes de corte diferentes. A equação 23, abaixo, apresenta uma permuta entre o talhão 5 da frente de corte F_1 e o talhão 11 da frente de corte F_2 .

$$\begin{cases} F_1 = \{T_{12}; T_5; T_8\} \\ F_2 = \{T_3; T_{22}; T_{11}; T_{30}\} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_1 = \{T_{12}; T_{11}; T_8\} \\ F_2 = \{T_3; T_{22}; T_5; T_{30}\} \end{cases} \quad (23)$$

Seja qual for a perturbação escolhida, após as substituições nas sequências de colheita das frentes de corte, é realizada a verificação do tempo necessário para que cada frente de corte realize a colheita da sua sequência de talhões, levando em consideração a produtividade de cada frente. Assim, uma de três ações possíveis será realizada:

- caso o tempo de colheita ultrapasse o horizonte de planejamento a sequência é readequada, retirando um talhão do final da sequência, até que seja ajustado o tempo de colheita com o horizonte de planejamento;

- caso o tempo de colheita fique corretamente ajustado com o horizonte de planejamento, a sequência será mantida conforme as substituições efetuadas;
- caso o tempo de colheita fique menor que o horizonte de planejamento, a sequência é readequada, incluindo um talhão aleatório, dentre os talhões não escolhidos para colheita, ao final da sequência da frente de corte até que seja adequado o tempo de colheita com o horizonte de planejamento.

O processo de busca da solução no método proposto inicia com o custo da solução aleatória proposta inicialmente. A solução é aceita como a solução atual do problema C_{atual} e como a melhor solução do problema até o momento C_{melhor} . Nesta solução é realizada uma das duas perturbações descritas anteriormente, sendo que a escolha do tipo de perturbação é feita de modo aleatório. A probabilidade de escolher o primeiro tipo de perturbação ficou definido em 75%, enquanto que o segundo tipo de perturbação tem 25% de probabilidade de ocorrer.

Após a perturbação e a adequação das sequências, tem-se uma possível nova solução que precisa ser testada. Para este teste, é calculado o custo total C_k , conforme descrito anteriormente pela equação 21, que serve de valor de teste para avaliar esta possível nova solução. Se o custo encontrado para esta possível nova solução for menor ou igual ao custo da melhor solução, $C_k \leq C_{melhor}$, então esta possível solução será aceita como solução atual e como a melhor solução até o momento, $C_{atual} = C_{melhor} = C_k$.

Porém, se o custo da possível solução for maior que o custo da melhor solução até então, $C_k > C_{melhor}$, descarta-se a possibilidade de atualizar a melhor solução até o momento, mas esta possível solução ainda pode ser escolhida como nova solução atual do problema. Para decidir sobre esta escolha, utilizou-se o Critério de Boltzmann descrito pela Equação 24 abaixo.

$$\text{rnd}[0,1) < \exp\left(-\frac{C_k - C_{\text{melhor}}}{T_k}\right) \quad (24)$$

Se este critério for aceito, então a possível solução é aceita como solução atual do problema, $C_{\text{atual}} = C_k$. Caso contrário, a perturbação é desfeita e descartada a possível solução.

Conforme apresentado pela equação 24, o Critério de Boltzmann depende de três parâmetros: o custo total da possível solução encontrada (C_k); o custo total da melhor solução encontrada até o momento (C_{melhor}); a temperatura atual do *Simulated Annealing* (T_k).

A temperatura do *Simulated Annealing* é um importante parâmetro nesta metaheurística, pois regula a probabilidade de aceitação de soluções menos eficientes que a melhor solução encontrada até o momento. Na prática, esta característica faz com que a metaheurística evite ficar estagnada em ótimos locais. Logo, no início do processo é necessário que a probabilidade de aceitação seja alta e que ela diminua de acordo com o aumento no número de iterações.

Por este motivo, a temperatura inicial do *Simulated Annealing* no método proposto é calculada com base no custo total da solução inicial encontrada, que tende a ser um valor elevado por ter sido construída de forma aleatória. Durante o processo a temperatura é atualizada, diminuindo gradualmente, quando ocorre uma das duas condições apresentadas abaixo:

- Se o *Simulated Annealing* já aceitou 7 novas soluções;
- Se o *Simulated Annealing* já testou 50 perturbações e, ainda, não aceitou 7 novas soluções.

A atualização da temperatura é realizada através da multiplicação do valor atual da temperatura por um parâmetro α definido inicialmente, conforme a Equação 25 abaixo.

$$T_{k+1} = \alpha \cdot T_k \quad (25)$$

Com a redução gradativa da temperatura, reduz, também, a probabilidade de aceitação de uma possível solução que não seja mais eficiente que a melhor solução encontrada até o momento. Desta forma, o método converge para valores próximos ao ótimo global do problema apresentado. Por se tratar de uma metaheurística, aceita-se que a resposta final, mesmo não sendo o ótimo global, seja uma boa solução para o problema.

Para encerrar o método, definiu-se que o critério de parada do *Simulated Annealing* é o tempo de processamento. Quando o tempo de processamento, previamente definido, é atingido, a metaheurística é interrompida e a melhor solução encontrada até o momento é aceita como a solução para o problema apresentado.

Ao encerrar o processo de otimização, a ferramenta desenvolvida constrói um arquivo de texto com dados obtidos que são apresentados na seguinte sequência:

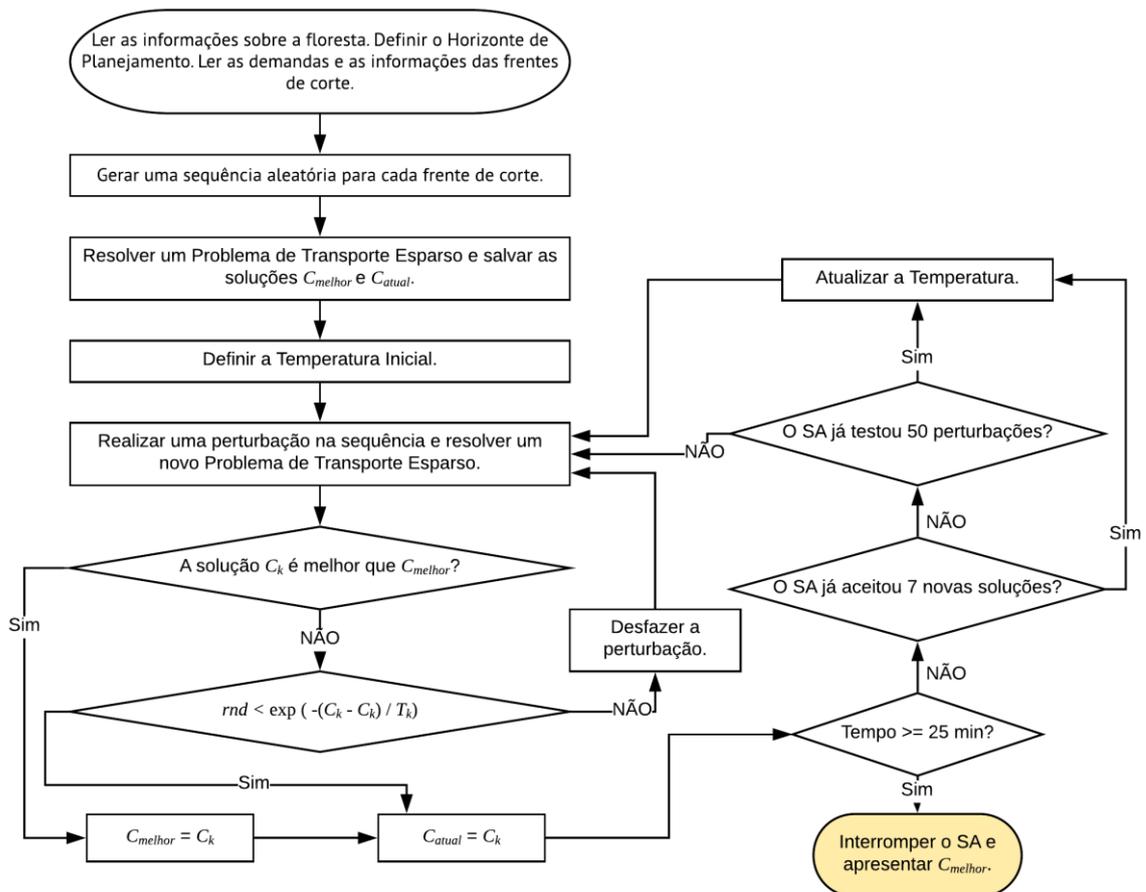
- a) A identificação do problema (Cenário utilizado);
- b) O horizonte de planejamento;
- c) A quantidade de ciclos de atualização de temperatura realizados;
- d) A quantidade de iterações realizadas (perturbações);
- e) O tempo de processamento do programa para otimizar o problema;
- f) O custo da melhor solução encontrada para o problema;
- g) A redução percentual em relação à primeira solução factível encontrada para o problema;
- h) A quantidade de soluções factíveis e infactíveis encontradas;
- i) O custo de cada uma das soluções encontradas;
- j) A sequência das frentes de corte para a melhor solução encontrada;
- k) Os dados sobre cada frente de corte informados inicialmente;
- l) As demandas de cada produto florestal em cada centro de demanda.

Com estas informações, pretende-se que o gestor de uma empresa florestal possa ter maior segurança ao planejar as escalas de trabalho, de suas frentes de cortes, de forma a minimizar os custos operacionais da empresa e, conseqüentemente, maximizar os lucros da mesma.

4.2.3 Fluxograma do Método Heurístico Proposto

A figura 8, abaixo, apresenta um fluxograma que representa o método explicado anteriormente.

FIGURA 8 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA.



FONTE: O Autor (2018)

5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Os testes computacionais foram realizados em um computador com processador Intel® Xeon® CPU E3-1225 V2 @ 3.20GHz, com memória RAM de 16 GB e sistema operacional Windows® 8 de 64 Bits. O modelo foi implementado em Microsoft Visual Studio Ultimate 2013, na linguagem Visual Basic 2013.

5.1 CENÁRIOS DE TESTE

Como já citado no capítulo anterior, com a finalidade de testar a metodologia apresentada foram criados 100 cenários fictícios, utilizando a ferramenta já apresentada. Cada um destes cenários foi criado com 50 talhões, de uma única espécie plantada, além de um único centro de demanda para onde os produtos florestais colhidos devem ser transportados. Em cada um destes talhões é possível colher até três tipos de produtos florestais distintos. As localizações destes talhões e do centro de demanda, dentro do cenário, foram determinadas de forma aleatória.

Os estoques de produtos de cada talhão também foram gerados de forma aleatória, porém baseados em valores obtidos de estoques de produtos reais de uma empresa florestal. Cada talhão foi classificado aleatoriamente de acordo com o tipo de relevo do terreno entre dois tipos possíveis (Tipo 1 e Tipo 2). O relevo do terreno interfere diretamente na produtividade da frente de corte.

5.2 TESTES COM O MÉTODO HEURÍSTICO

5.2.1 Parâmetros

Para todos os testes do método heurístico, o horizonte de planejamento foi estipulado em 15 dias. De modo a equilibrar os testes, para todos foram utilizadas as mesmas informações de demandas diárias por cada um dos três produtos florestais e, também, as mesmas

informações sobre as frentes de corte. A saber, foram instituídas três frente de corte para atuar na colheita em todos os testes. Os dados das frentes de corte seguem no Quadro 6 abaixo:

QUADRO 6 – DADOS DAS FRENTE DE CORTE UTILIZADAS NOS TESTES.

Frente de Corte	Custo Operacional (\$/ha)	Custo de Movimentação (\$/km)	Produtividade por Relevo	
			Tipo 1 (ha/dia)	Tipo 2 (ha/dia)
1	0,50	3,00	2,0	1,5
2	1,00	7,00	4,0	2,0
3	0,80	4,00	2,5	1,7

FONTE: O Autor (2018)

Como, no presente momento, a finalidade destes testes é puramente acadêmica, pois se busca apenas demonstrar a funcionalidade e a capacidade do método, foi estabelecido que todos os testes teriam tempo computacional de 25 minutos e, ao final deste tempo, o teste seria interrompido e a solução atual seria avaliada quanto à sua factibilidade.

De acordo com os resultados apresentados no livro de Aarts & Korst (1989), os melhores resultados para o *Simulated Annealing* foram obtidos quando o valor da constante de atualização da temperatura (α) estava entre 0,80 e 0,99. Sendo assim, estabeleceu-se para estes testes que seriam utilizados três valores distintos para esta constante: 0,90, 0,95 e 0,99. E para cada um destes valores seriam realizados 10 testes independentes. Após a realização dos testes os valores da constante seriam avaliados para observar se a alteração no valor da constante produziu resultados significativamente diferentes.

5.2.2 Resultados dos Testes

Conforme apresentado anteriormente, foram realizados então 3.000 testes, sendo 10 testes para cada valor do parâmetro de atualização de temperatura do *Simulated Annealing* e para cada Cenário gerado. Porém, apesar da maioria dos cenários (81 cenários) apresentar respostas nos 30 testes realizados, 19 cenários não conseguiram concluir os 30 testes com solução factível em todos.

Logo, de modo a realizar uma comparação igualitária entre os cenários testados, comparando apenas os cenários que atingiram solução factível nos 30 testes, optou-se por não considerar estes 19 cenários nas comparações do método heurístico. Foram desconsiderados os cenários: 6; 18; 24; 47; 51; 55; 59; 62; 63; 67; 68; 72; 76; 84; 86; 89; 91; 92; 98. Os resultados obtidos nos 2.430 testes foram compilados de forma a fazer uma comparação da performance do método heurístico utilizando os diferentes valores de α para cada um dos cenários.

As comparações dispostas nas tabelas 1 a 5 foram, todas, efetuadas através dos 10 testes realizados para cada cenário e cada valor de α .

A Tabela 1 apresenta a comparação entre as quantidades de ciclos de temperatura realizados e cada dado apresenta a média do número de ciclos de temperatura. A Tabela 2 apresenta a comparação entre as quantidades de iterações realizadas nos testes e cada dado apresenta a média do número de iterações. A Tabela 3 mostra a comparação entre o melhor valor obtido, para a melhor solução do problema. Neste caso, cada dado da tabela é o melhor dentre os 10 testes realizados. A Tabela 4 apresenta a comparação entre as médias das melhores soluções obtidas, enquanto a Tabela 5 apresenta a comparação entre os desvios-padrão das melhores soluções dentre os testes realizados.

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os gráficos comparativos entre os valores médios da melhor solução obtida e a primeira solução factível obtida para cada cenário, sendo que cada gráfico apresenta os dados para um valor de α : 0,99, 0,95 e 0,90, respectivamente.

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DE CICLOS DE TEMPERATURA EM CADA CENÁRIO E PARA CADA VALOR DE α .

Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$	Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$	Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$
1	10,7	7,4	7,3	31	11,6	18,1	19,7	64	10,0	9,6	6,4
2	8,4	9,2	13,3	32	8,5	9,0	9,8	65	10,0	8,7	9,4
3	8,9	8,4	7,1	33	9,1	9,5	9,3	66	10,0	10,5	9,0
4	10,5	7,6	9,8	34	8,6	7,5	6,6	69	6,7	6,8	7,3
5	8,6	8,2	9,7	35	12,4	11,6	12,8	70	9,1	7,2	6,5
7	8,7	7,2	7,9	36	8,6	9,3	7,7	71	7,1	8,2	6,4
8	6,3	7,6	7,3	37	9,2	7,9	7,8	73	11,4	14,2	14,2
9	9,2	9,7	9,4	38	10,0	8,7	8,2	74	10,2	8,2	7,8
10	6,5	6,2	6,6	39	7,1	8,0	6,8	75	7,6	7,3	8,4
11	9,9	8,1	8,1	40	8,7	7,3	6,9	77	8,6	7,9	9,4
12	9,2	7,3	8,0	41	8,2	9,1	7,5	78	9,4	5,8	7,4
13	7,3	7,4	7,6	42	8,7	9,7	8,9	79	8,3	8,2	8,9
14	18,5	15,4	18,5	43	11,7	16,0	13,7	80	10,1	11,8	12,1
15	8,0	7,9	7,4	44	7,9	8,3	5,7	81	8,3	9,0	7,5
16	8,7	7,4	8,1	45	7,6	9,1	7,4	82	8,6	9,1	7,8
17	8,0	6,8	9,9	46	11,2	8,9	7,7	83	9,0	8,3	7,6
19	9,7	7,5	7,5	48	8,6	9,6	8,3	85	8,9	7,3	5,4
20	7,6	9,2	9,7	49	9,4	7,7	7,4	87	7,5	7,0	7,4
21	7,6	10,0	9,6	50	8,3	8,6	9,1	88	8,1	7,6	6,5
22	9,4	6,5	6,4	52	10,0	9,6	8,5	90	6,8	8,0	7,1
23	8,9	9,5	8,0	53	9,1	8,3	7,1	93	10,1	9,1	10,3
25	9,2	8,4	7,9	54	8,6	8,6	8,3	94	8,8	9,7	8,6
26	11,5	11,7	12,8	56	9,0	9,0	8,0	95	8,3	8,9	8,7
27	9,7	8,1	8,7	57	9,1	8,5	10,1	96	7,6	8,4	7,5
28	12,4	12,7	13,0	58	10,4	6,5	8,7	97	8,8	6,8	7,5
29	8,8	7,6	6,9	60	6,0	7,7	8,3	99	8,9	7,6	7,5
30	9,8	7,3	7,2	61	9,4	7,8	8,1	100	6,6	9,6	11,8

FONTE: O Autor (2018)

TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DAS QUANTIDADES DE ITERAÇÕES EM CADA CENÁRIO E PARA CADA VALOR DE α .

Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$	Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$	Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$
1	130,9	134,5	127,1	31	152,4	220,2	226,0	64	133,6	130,5	123,8
2	138,7	139,6	216,9	32	125,3	125,3	158,8	65	116,0	122,9	123,9
3	124,9	118,1	106,4	33	125,3	137,6	120,3	66	124,2	124,9	123,0
4	128,5	112,7	119,7	34	127,1	127,0	104,7	69	101,0	116,8	105,1
5	118,4	128,1	124,9	35	172,4	223,6	209,3	70	100,6	109,2	110,0
7	137,4	108,2	116,2	36	111,4	117,3	106,5	71	106,3	120,8	101,7
8	101,3	105,2	110,2	37	103,9	97,0	89,5	73	221,5	206,2	241,5
9	125,3	119,6	112,4	38	129,0	137,7	126,3	74	126,3	121,2	128,1
10	109,0	114,9	102,9	39	89,8	102,6	99,9	75	103,8	108,5	112,6
11	136,4	117,2	136,4	40	119,3	106,6	123,6	77	110,7	116,1	127,2
12	126,9	114,4	112,6	41	110,8	114,2	111,4	78	124,9	103,6	116,4
13	114,4	110,2	119,6	42	130,7	134,0	129,2	79	111,4	127,3	119,7
14	255,7	221,7	263,1	43	161,7	253,1	237,3	80	152,2	152,9	166,6
15	117,4	117,6	111,8	44	121,0	125,6	108,9	81	125,9	122,4	118,8
16	117,2	104,2	115,6	45	119,9	124,5	130,3	82	130,1	148,8	128,2
17	110,3	109,9	109,4	46	147,5	146,4	121,3	83	129,3	110,2	137,8
19	136,2	133,5	122,0	48	131,8	133,3	123,5	85	108,6	103,0	93,7
20	137,5	147,3	153,5	49	140,7	116,5	115,2	87	110,2	104,7	111,7
21	112,1	119,2	123,9	50	111,1	110,1	112,1	88	113,4	113,5	101,5
22	126,9	112,4	116,9	52	117,8	128,6	113,1	90	117,3	109,1	117,2
23	108,8	110,9	110,7	53	115,6	111,5	101,9	93	139,8	137,3	128,5
25	126,0	130,9	119,1	54	130,1	117,5	128,5	94	123,8	129,3	120,9
26	143,7	178,3	189,1	56	128,1	126,8	123,5	95	117,8	123,7	117,4
27	123,0	121,7	116,5	57	118,2	106,7	128,0	96	108,5	114,3	114,5
28	169,2	192,3	211,8	58	134,8	105,7	122,1	97	110,4	97,1	105,5
29	131,5	136,8	105,5	60	99,0	125,7	114,5	99	114,9	132,5	128,4
30	127,7	118,5	101,6	61	140,6	124,2	132,3	100	118,6	157,7	193,2

FONTE: O Autor (2018)

TABELA 3 – COMPARAÇÃO ENTRE AS MELHORES SOLUÇÕES OBTIDAS EM CADA CENÁRIO E PARA CADA VALOR DE α .

Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$	Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$	Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$
1	\$ 57.067,55	\$ 42.776,50	\$ 46.502,82	31	\$ 42.448,85	\$ 46.244,12	\$ 41.466,14	64	\$ 64.874,58	\$ 41.048,25	\$ 29.108,11
2	\$ 37.553,51	\$ 41.104,84	\$ 68.435,46	32	\$ 34.862,72	\$ 27.191,45	\$ 30.007,15	65	\$ 33.158,95	\$ 43.688,55	\$ 31.588,13
3	\$ 37.146,59	\$ 50.731,88	\$ 50.981,73	33	\$ 31.766,27	\$ 32.714,92	\$ 36.983,63	66	\$ 47.307,02	\$ 39.246,50	\$ 44.215,43
4	\$ 40.403,10	\$ 35.386,66	\$ 36.944,97	34	\$ 46.668,92	\$ 47.150,50	\$ 34.571,60	69	\$ 49.133,72	\$ 28.899,26	\$ 37.095,91
5	\$ 46.123,23	\$ 56.300,00	\$ 35.440,47	35	\$ 55.709,33	\$ 73.743,10	\$ 42.287,30	70	\$ 52.647,07	\$ 44.957,57	\$ 52.392,86
7	\$ 59.049,02	\$ 47.494,69	\$ 59.298,69	36	\$ 44.551,58	\$ 34.809,87	\$ 48.597,87	71	\$ 54.916,31	\$ 76.499,31	\$ 51.877,65
8	\$ 38.629,64	\$ 52.305,61	\$ 45.809,93	37	\$ 40.148,31	\$ 46.484,89	\$ 37.540,39	73	\$ 64.659,34	\$ 66.568,06	\$ 63.884,56
9	\$ 35.320,11	\$ 32.214,62	\$ 38.427,15	38	\$ 42.465,46	\$ 46.433,80	\$ 37.323,22	74	\$ 58.943,48	\$ 46.331,34	\$ 41.393,77
10	\$ 44.524,33	\$ 52.916,62	\$ 54.074,23	39	\$ 38.664,98	\$ 37.908,48	\$ 40.675,88	75	\$ 34.051,54	\$ 38.279,56	\$ 39.984,98
11	\$ 24.217,49	\$ 41.696,87	\$ 32.314,30	40	\$ 58.836,98	\$ 68.406,49	\$ 50.793,54	77	\$ 46.457,68	\$ 36.510,75	\$ 38.349,45
12	\$ 55.782,71	\$ 53.483,54	\$ 37.525,90	41	\$ 45.461,93	\$ 33.650,53	\$ 39.717,85	78	\$ 64.840,67	\$ 36.302,16	\$ 50.975,51
13	\$ 36.205,31	\$ 45.121,45	\$ 42.636,12	42	\$ 39.510,01	\$ 59.604,19	\$ 43.683,01	79	\$ 36.361,91	\$ 35.433,90	\$ 46.666,90
14	\$ 35.210,78	\$ 43.162,19	\$ 34.767,03	43	\$ 45.217,00	\$ 74.039,42	\$ 55.329,12	80	\$ 38.993,16	\$ 33.639,09	\$ 34.958,51
15	\$ 38.016,27	\$ 38.877,59	\$ 39.910,00	44	\$ 57.452,41	\$ 39.957,29	\$ 44.001,85	81	\$ 38.595,89	\$ 41.063,49	\$ 58.885,10
16	\$ 28.899,88	\$ 34.539,70	\$ 37.144,02	45	\$ 35.219,70	\$ 36.467,98	\$ 33.865,69	82	\$ 62.962,66	\$ 37.464,84	\$ 42.223,07
17	\$ 31.642,48	\$ 41.586,52	\$ 40.603,78	46	\$ 43.290,21	\$ 45.893,23	\$ 30.381,73	83	\$ 43.222,39	\$ 44.757,65	\$ 32.064,39
19	\$ 31.912,03	\$ 35.880,81	\$ 39.380,90	48	\$ 37.874,20	\$ 37.723,48	\$ 34.184,75	85	\$ 46.958,56	\$ 42.858,89	\$ 28.688,80
20	\$ 56.448,02	\$ 38.472,70	\$ 51.211,42	49	\$ 29.899,19	\$ 32.681,33	\$ 48.189,42	87	\$ 33.381,32	\$ 37.324,68	\$ 42.157,30
21	\$ 30.499,01	\$ 36.404,22	\$ 46.451,89	50	\$ 42.591,34	\$ 33.922,16	\$ 32.996,21	88	\$ 41.299,95	\$ 40.221,51	\$ 39.367,78
22	\$ 74.301,57	\$ 74.119,09	\$ 61.193,74	52	\$ 48.093,19	\$ 48.561,07	\$ 59.021,81	90	\$ 39.494,41	\$ 37.049,25	\$ 43.040,08
23	\$ 42.439,61	\$ 40.160,60	\$ 55.302,70	53	\$ 36.111,37	\$ 41.026,52	\$ 30.668,08	93	\$ 67.388,01	\$ 46.088,97	\$ 47.952,68
25	\$ 42.824,19	\$ 51.596,05	\$ 43.874,05	54	\$ 34.816,18	\$ 32.500,93	\$ 42.060,32	94	\$ 58.518,52	\$ 38.415,31	\$ 28.314,03
26	\$ 47.606,29	\$ 27.817,20	\$ 25.770,05	56	\$ 50.636,13	\$ 56.804,86	\$ 34.872,17	95	\$ 32.288,02	\$ 31.792,15	\$ 41.084,32
27	\$ 34.354,26	\$ 43.541,51	\$ 47.530,72	57	\$ 46.206,05	\$ 25.386,45	\$ 38.745,05	96	\$ 61.423,25	\$ 34.006,98	\$ 37.925,23
28	\$ 70.613,99	\$ 36.570,77	\$ 67.813,89	58	\$ 38.462,35	\$ 53.328,33	\$ 40.573,12	97	\$ 57.924,08	\$ 41.706,96	\$ 54.430,13
29	\$ 33.384,99	\$ 46.554,66	\$ 52.640,01	60	\$ 54.146,55	\$ 50.789,90	\$ 44.796,65	99	\$ 45.750,21	\$ 55.733,08	\$ 55.989,04
30	\$ 41.839,66	\$ 31.692,29	\$ 49.491,92	61	\$ 46.543,81	\$ 32.922,20	\$ 36.193,72	100	\$ 39.197,04	\$ 29.982,79	\$ 48.541,80

FONTE: O Autor (2018)

TABELA 4 – COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DA MELHOR SOLUÇÃO OBTIDA EM CADA CENÁRIO E PARA CADA VALOR DE α .

Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$	Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$	Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$
1	\$75.233,68	\$72.093,85	\$69.110,86	31	\$ 63.502,54	\$ 59.414,44	\$ 52.785,62	64	\$ 83.426,17	\$ 65.056,18	\$ 62.566,11
2	\$75.157,56	\$62.563,35	\$83.960,36	32	\$ 64.801,68	\$ 55.488,23	\$ 57.209,96	65	\$ 62.362,79	\$ 75.377,25	\$ 60.452,47
3	\$83.347,38	\$69.748,26	\$75.912,91	33	\$ 60.631,80	\$ 58.191,26	\$ 65.242,04	66	\$ 61.809,47	\$ 53.293,85	\$ 64.466,30
4	\$66.820,55	\$63.996,22	\$62.239,93	34	\$ 77.703,78	\$ 76.065,58	\$ 86.433,47	69	\$ 75.992,32	\$ 54.012,53	\$ 70.579,41
5	\$76.772,12	\$87.677,11	\$75.328,58	35	\$ 97.130,17	\$ 92.300,65	\$ 72.701,77	70	\$ 77.758,09	\$ 69.839,35	\$ 74.867,60
7	\$79.622,18	\$91.797,17	\$85.313,29	36	\$ 63.147,07	\$ 56.422,95	\$ 74.211,97	71	\$ 79.051,04	\$ 101.970,86	\$ 82.960,37
8	\$78.840,31	\$72.276,55	\$71.107,45	37	\$ 66.510,64	\$ 62.497,42	\$ 58.195,21	73	\$ 76.012,27	\$ 76.361,56	\$ 71.004,18
9	\$63.166,49	\$56.481,28	\$60.139,44	38	\$ 76.588,99	\$ 65.145,27	\$ 55.615,89	74	\$ 81.864,28	\$ 72.528,28	\$ 70.899,64
10	\$65.656,60	\$79.139,20	\$67.698,24	39	\$ 72.534,46	\$ 69.910,01	\$ 71.586,87	75	\$ 57.747,85	\$ 63.214,22	\$ 67.617,51
11	\$55.177,37	\$51.701,62	\$61.896,70	40	\$ 84.991,40	\$ 84.260,56	\$ 76.248,60	77	\$ 71.057,00	\$ 63.007,67	\$ 55.703,08
12	\$74.436,32	\$73.433,11	\$65.931,45	41	\$ 84.591,61	\$ 59.863,13	\$ 52.550,83	78	\$ 81.627,16	\$ 58.638,96	\$ 68.652,41
13	\$69.208,33	\$62.433,62	\$54.285,25	42	\$ 66.230,03	\$ 80.618,12	\$ 71.726,38	79	\$ 71.045,30	\$ 62.504,54	\$ 74.001,24
14	\$48.934,64	\$50.330,11	\$45.488,54	43	\$ 71.893,07	\$ 89.083,09	\$ 84.579,62	80	\$ 65.583,69	\$ 54.780,89	\$ 49.650,08
15	\$82.062,23	\$63.690,70	\$71.904,14	44	\$ 81.662,10	\$ 90.949,27	\$ 75.552,65	81	\$ 75.579,32	\$ 79.867,15	\$ 72.407,61
16	\$47.901,53	\$50.573,83	\$58.213,91	45	\$ 60.397,12	\$ 60.972,62	\$ 73.157,11	82	\$ 79.365,94	\$ 64.687,79	\$ 62.826,62
17	\$56.990,66	\$63.650,80	\$59.599,74	46	\$ 70.229,66	\$ 66.968,32	\$ 67.625,90	83	\$ 64.604,04	\$ 64.831,12	\$ 60.447,78
19	\$52.881,71	\$61.049,30	\$67.842,86	48	\$ 62.288,43	\$ 56.823,40	\$ 64.992,53	85	\$ 83.319,16	\$ 61.336,89	\$ 72.462,31
20	\$72.155,86	\$69.107,84	\$63.226,34	49	\$ 63.125,15	\$ 68.451,59	\$ 65.382,15	87	\$ 55.873,49	\$ 61.954,76	\$ 60.798,76
21	\$61.176,97	\$62.381,85	\$67.771,35	50	\$ 65.719,00	\$ 59.962,99	\$ 53.208,88	88	\$ 64.963,76	\$ 63.265,85	\$ 63.625,92
22	\$97.851,46	\$109.222,93	\$90.767,70	52	\$ 70.901,24	\$ 80.160,55	\$ 76.828,81	90	\$ 59.481,40	\$ 66.057,74	\$ 61.786,28
23	\$62.539,97	\$64.917,24	\$77.454,13	53	\$ 59.519,95	\$ 53.462,40	\$ 50.948,27	93	\$ 94.435,31	\$ 68.818,67	\$ 71.798,33
25	\$75.319,08	\$75.848,93	\$68.120,35	54	\$ 69.334,31	\$ 55.861,11	\$ 64.381,56	94	\$ 73.524,15	\$ 66.429,55	\$ 59.704,81
26	\$71.920,04	\$68.917,66	\$49.381,97	56	\$ 86.078,05	\$ 74.219,93	\$ 71.455,80	95	\$ 56.659,01	\$ 47.481,54	\$ 67.794,05
27	\$71.236,85	\$74.237,53	\$65.082,67	57	\$ 68.768,77	\$ 69.144,75	\$ 64.606,64	96	\$ 83.675,09	\$ 56.413,25	\$ 60.643,17
28	\$93.774,32	\$76.191,28	\$78.851,59	58	\$ 62.110,37	\$ 64.271,41	\$ 66.136,93	97	\$ 79.860,56	\$ 89.591,18	\$ 79.405,65
29	\$74.161,28	\$80.165,97	\$78.055,59	60	\$ 84.286,69	\$ 75.124,38	\$ 72.404,68	99	\$ 78.720,27	\$ 90.415,02	\$ 74.653,36
30	\$73.083,81	\$72.549,71	\$74.492,29	61	\$ 72.702,35	\$ 52.585,08	\$ 53.664,96	100	\$ 69.978,54	\$ 80.857,39	\$ 68.769,74

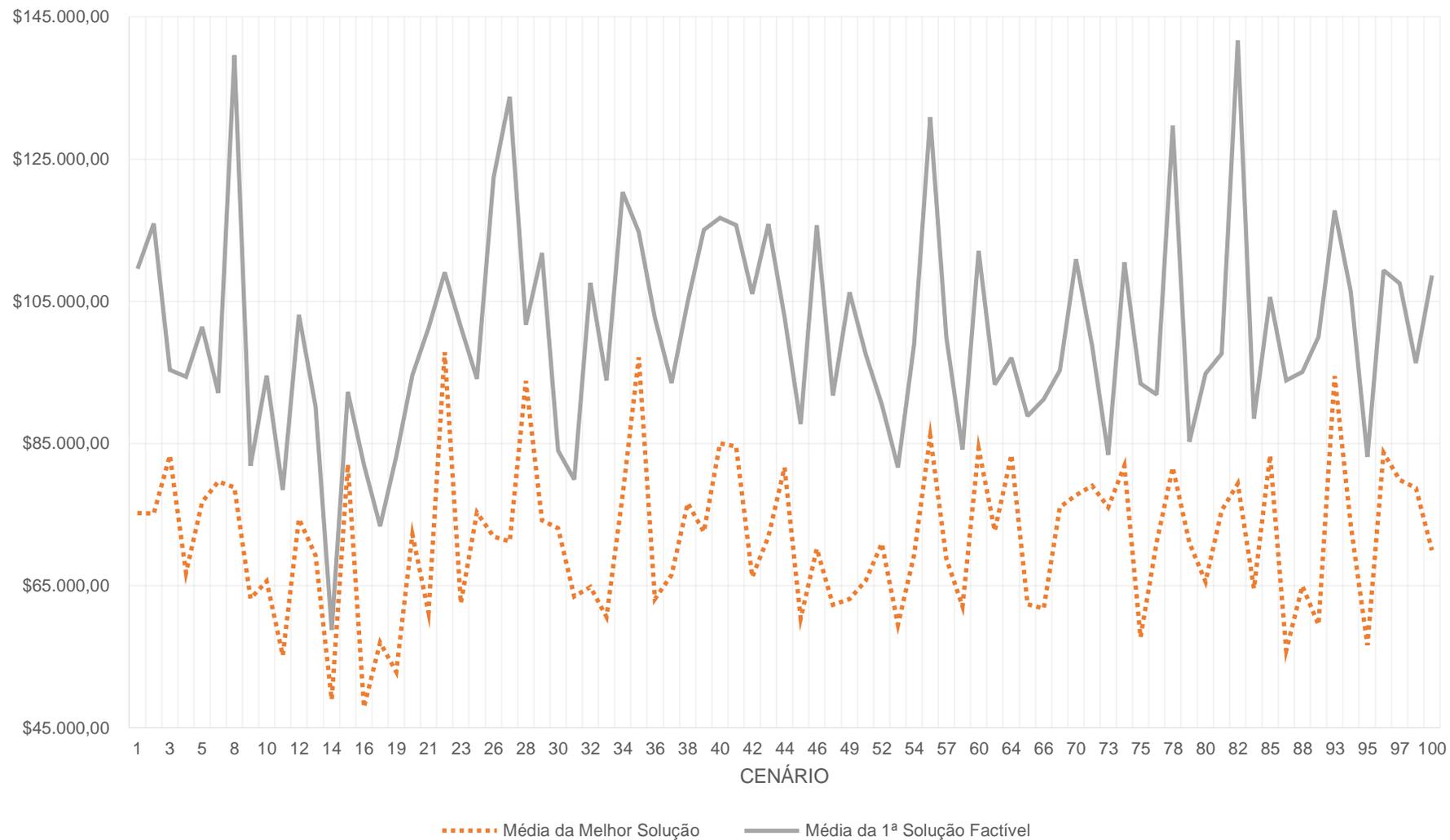
FONTE: O Autor (2018)

TABELA 5 – COMPARAÇÃO ENTRE OS DESVIOS-PADRÃO DA MELHOR SOLUÇÃO OBTIDA EM CADA CENÁRIO E PARA CADA VALOR DE α .

Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$	Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$	Cenário	$\alpha = 0,99$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,90$
1	\$ 22.454,57	\$ 16.232,97	\$ 21.711,48	31	\$ 14.933,30	\$ 13.436,06	\$ 9.007,07	64	\$ 17.394,74	\$ 25.910,36	\$ 22.044,32
2	\$ 25.936,26	\$ 15.215,42	\$ 15.867,02	32	\$ 25.773,54	\$ 17.189,86	\$ 15.048,58	65	\$ 17.643,67	\$ 21.115,17	\$ 16.427,95
3	\$ 29.022,63	\$ 11.045,19	\$ 18.726,64	33	\$ 29.685,26	\$ 17.346,22	\$ 16.874,95	66	\$ 10.237,97	\$ 10.188,89	\$ 18.578,84
4	\$ 19.549,37	\$ 14.135,20	\$ 16.772,35	34	\$ 16.532,22	\$ 17.087,48	\$ 33.155,47	69	\$ 21.296,96	\$ 12.918,03	\$ 18.812,46
5	\$ 21.581,64	\$ 36.858,85	\$ 38.535,66	35	\$ 44.519,89	\$ 15.333,59	\$ 14.541,57	70	\$ 16.184,30	\$ 13.032,11	\$ 17.393,27
7	\$ 21.579,55	\$ 35.133,95	\$ 17.884,40	36	\$ 13.698,17	\$ 17.430,37	\$ 14.025,97	71	\$ 16.463,03	\$ 33.436,28	\$ 16.321,36
8	\$ 30.865,16	\$ 20.500,47	\$ 17.732,19	37	\$ 17.761,76	\$ 13.712,73	\$ 15.643,11	73	\$ 7.961,91	\$ 6.698,60	\$ 7.268,44
9	\$ 16.441,56	\$ 19.353,37	\$ 13.674,76	38	\$ 25.532,76	\$ 16.730,18	\$ 12.317,44	74	\$ 14.483,53	\$ 15.574,51	\$ 18.678,17
10	\$ 11.631,22	\$ 17.692,19	\$ 12.675,42	39	\$ 28.565,77	\$ 36.023,39	\$ 14.398,81	75	\$ 17.870,63	\$ 16.992,15	\$ 37.041,25
11	\$ 19.551,79	\$ 6.558,84	\$ 28.758,12	40	\$ 26.810,13	\$ 23.655,04	\$ 16.453,31	77	\$ 22.166,49	\$ 21.097,42	\$ 11.300,04
12	\$ 17.129,57	\$ 12.697,28	\$ 22.435,97	41	\$ 32.508,05	\$ 13.267,44	\$ 8.823,62	78	\$ 14.311,70	\$ 17.898,72	\$ 15.011,12
13	\$ 30.968,03	\$ 16.325,96	\$ 13.275,34	42	\$ 20.868,52	\$ 19.393,19	\$ 24.776,14	79	\$ 28.374,23	\$ 17.249,70	\$ 19.195,90
14	\$ 7.162,99	\$ 6.578,65	\$ 5.558,58	43	\$ 42.791,04	\$ 15.778,82	\$ 13.314,93	80	\$ 17.446,67	\$ 11.937,63	\$ 12.563,11
15	\$ 23.169,77	\$ 20.550,15	\$ 15.610,61	44	\$ 16.850,04	\$ 32.944,89	\$ 21.062,98	81	\$ 25.803,70	\$ 31.069,56	\$ 11.893,26
16	\$ 12.716,69	\$ 22.325,75	\$ 13.078,57	45	\$ 19.175,82	\$ 21.439,13	\$ 35.016,45	82	\$ 16.656,97	\$ 21.351,39	\$ 16.981,55
17	\$ 14.951,07	\$ 17.286,68	\$ 12.458,24	46	\$ 30.710,38	\$ 11.907,33	\$ 23.430,19	83	\$ 13.337,65	\$ 14.084,00	\$ 21.365,80
19	\$ 15.301,65	\$ 33.761,36	\$ 28.568,16	48	\$ 25.741,01	\$ 17.534,55	\$ 24.041,62	85	\$ 30.208,04	\$ 9.427,23	\$ 29.829,14
20	\$ 9.447,20	\$ 27.860,07	\$ 9.863,79	49	\$ 18.056,68	\$ 17.372,83	\$ 15.272,23	87	\$ 21.843,07	\$ 21.208,85	\$ 20.090,11
21	\$ 20.745,04	\$ 20.170,34	\$ 20.843,34	50	\$ 20.868,96	\$ 19.574,49	\$ 13.918,48	88	\$ 21.231,24	\$ 19.405,77	\$ 16.073,98
22	\$ 18.773,92	\$ 33.763,34	\$ 15.844,19	52	\$ 12.675,77	\$ 25.556,91	\$ 15.056,44	90	\$ 18.881,89	\$ 21.225,81	\$ 12.017,98
23	\$ 15.641,46	\$ 19.599,79	\$ 26.577,94	53	\$ 26.975,97	\$ 8.944,22	\$ 14.917,70	93	\$ 43.695,88	\$ 18.315,75	\$ 16.828,71
25	\$ 20.552,58	\$ 16.296,44	\$ 14.375,34	54	\$ 29.271,68	\$ 17.560,86	\$ 20.066,55	94	\$ 14.343,04	\$ 19.031,14	\$ 17.897,85
26	\$ 17.963,83	\$ 36.878,13	\$ 18.913,73	56	\$ 33.669,93	\$ 19.831,88	\$ 28.835,17	95	\$ 18.199,64	\$ 13.559,35	\$ 26.799,97
27	\$ 29.404,90	\$ 22.635,77	\$ 17.979,38	57	\$ 12.065,29	\$ 19.040,28	\$ 16.756,52	96	\$ 25.601,21	\$ 14.170,53	\$ 15.631,63
28	\$ 18.458,89	\$ 20.932,45	\$ 11.514,04	58	\$ 19.113,31	\$ 8.955,34	\$ 12.738,15	97	\$ 13.247,35	\$ 36.678,50	\$ 13.981,54
29	\$ 27.924,70	\$ 17.643,22	\$ 14.529,28	60	\$ 22.034,29	\$ 16.084,72	\$ 16.521,06	99	\$ 27.680,06	\$ 26.905,79	\$ 12.027,21
30	\$ 19.798,39	\$ 20.266,53	\$ 16.208,31	61	\$ 30.158,44	\$ 9.176,23	\$ 10.654,13	100	\$ 27.018,47	\$ 26.580,08	\$ 14.102,52

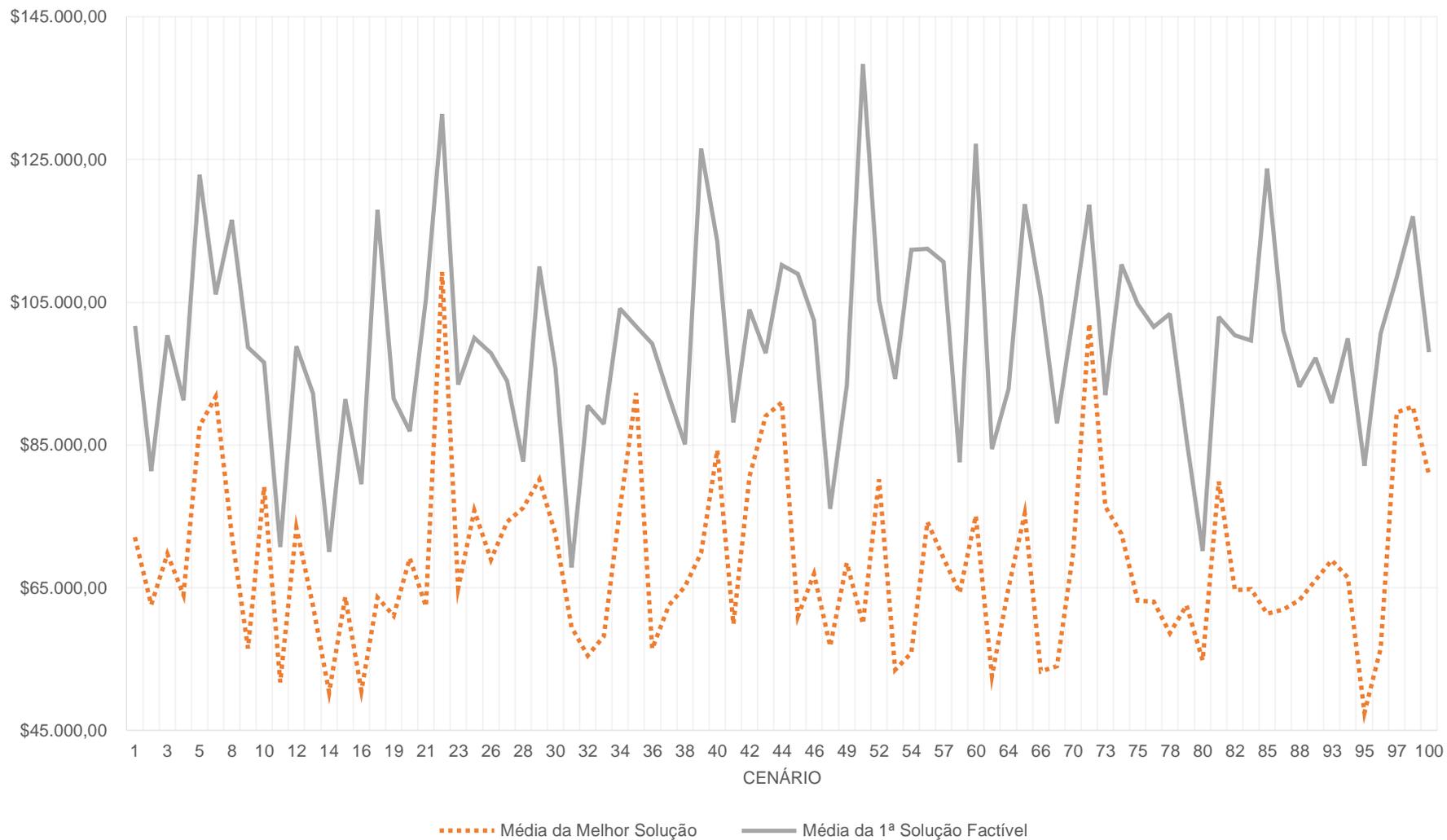
FONTE: O Autor (2018)

FIGURA 9 – COMPARATIVO ENTRE AS MÉDIAS DA MELHOR SOLUÇÃO E DA 1ª SOLUÇÃO FACTÍVEL OBTIDA POR CENÁRIO PARA $\alpha = 0,99$.



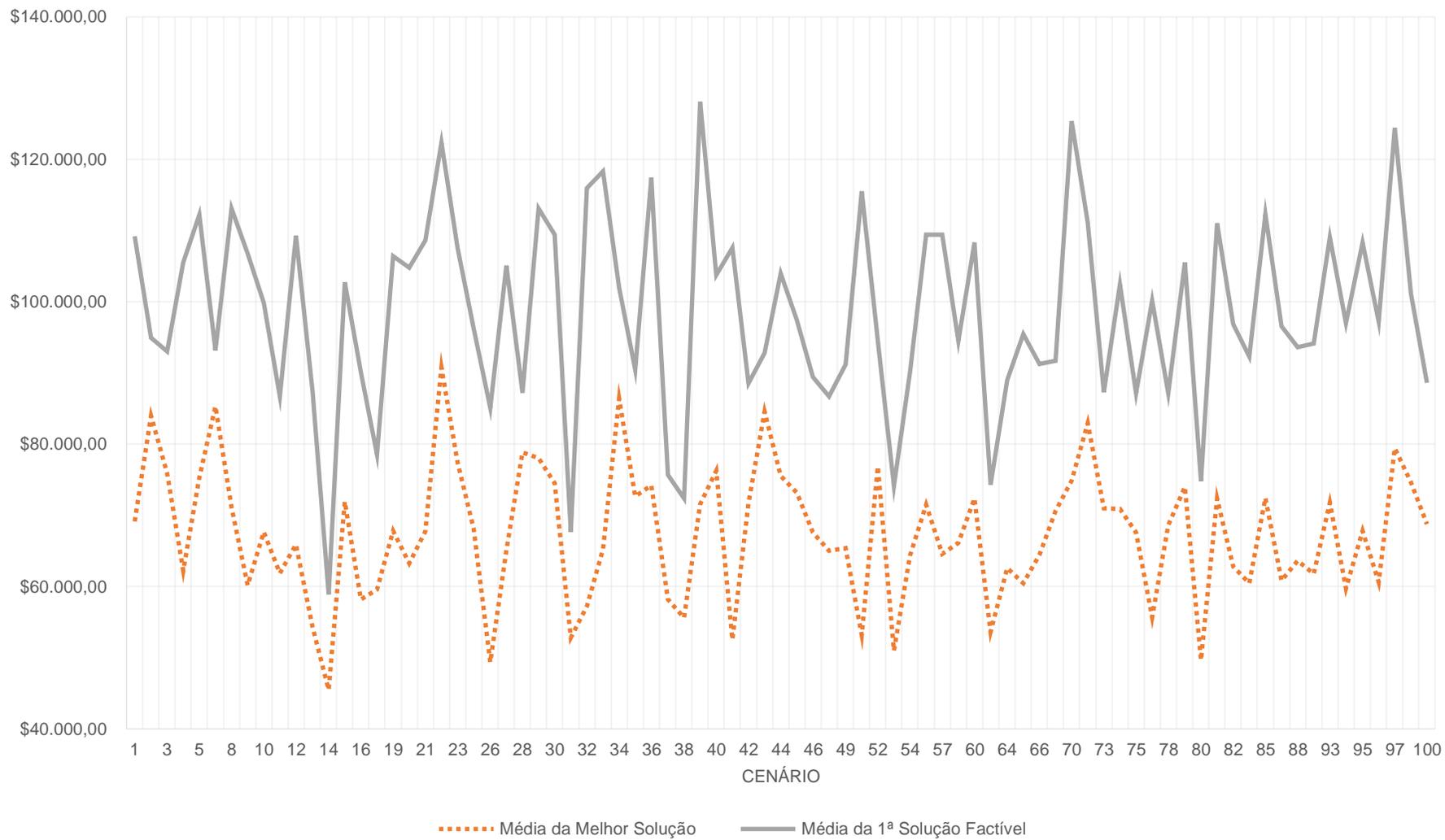
FONTE: O Autor (2018)

FIGURA 10 – COMPARATIVO ENTRE AS MÉDIAS DA MELHOR SOLUÇÃO E DA 1ª SOLUÇÃO FACTÍVEL OBTIDA POR CENÁRIO PARA $\alpha = 0,95$.



FONTE: O Autor (2018)

FIGURA 11 – COMPARATIVO ENTRE AS MÉDIAS DA MELHOR SOLUÇÃO E DA 1ª SOLUÇÃO FACTÍVEL OBTIDA POR CENÁRIO PARA $\alpha = 0,90$.



FONTE: O Autor (2018)

5.3 TESTES COM O MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático apresentado no capítulo anterior é classificado como um Problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e foi implementado em dois softwares de otimização de problemas de programação linear, conhecidos como *solvers*, o LINGO³ e o GUROBI⁴. Esta implementação visava as soluções ótimas para o problema apresentado e a comparação com as soluções encontradas pelo método heurístico, apresentado nesta tese.

Entendendo que os 100 cenários gerados possuem alto nível de complexidade para serem otimizados, foram gerados três cenários com menor complexidade para testes preliminares.

5.3.1 Testes Preliminares

O primeiro cenário foi nomeado de Teste 1, possuindo 12 talhões e um único centro de demanda. Cada um destes talhões possui apenas um produto florestal e seu relevo pode ser classificado como tipo 1 ou tipo 2. Foram consideradas duas frentes de corte distintas para efetuar a colheita destes talhões, sendo que estas frentes possuem custos operacionais, custo de deslocamento e produtividades distintas. O horizonte de planejamento foi fixado em 7 dias e o centro apresenta uma demanda diária constante por este único produto florestal que pode ser colhido.

Este pode ser considerado um cenário pequeno e de fácil otimização. Quando o modelo foi implementado no *solver* LINGO, este o classificou como um modelo da classe PLIM e determinou para este cenário 5.006 variáveis, sendo 4.248 variáveis inteiras, além de 3.720 restrições para o modelo.

Este modelo foi resolvido pelo *solver* LINGO e foi gerado um arquivo de extensão *.mps*, que foi utilizado para resolvê-lo através do

³ LINDO Systems Inc. (2013) – versão Extended Lingo/Win 64 13.0.2.21

⁴ Gurobi Optimization Inc. (2017) – versão 7.5.2

solver GUROBI. Para fins de comparação, o mesmo cenário foi implementado no modelo heurístico apresentado na tese. A Tabela 6 apresenta a comparação do desempenho destes dois *solvers* e do método heurístico proposto, comparando o tempo de processamento, as soluções obtidas e o GAP (diferença percentual) destas soluções em relação à solução ótima encontrada pelos *solvers*.

TABELA 6 – COMPARAÇÃO ENTRE MODELO EXATO E MÉTODO HEURÍSTICO NO CENÁRIO TESTE 1

	Tempo	Solução	GAP₁ (LINGO)	GAP₂ (GUROBI)
LINGO	13 s	\$ 9.640,17	0,00 %	0,00 %
GUROBI	1,93 s	\$ 9.640,17	0,00 %	0,00 %
Heurística	2,77 s	\$ 13.650,50	41,60 %	41,60 %
Heurística	60 s	\$ 11.287,20	17,09 %	17,09 %
Heurística	150 s	\$ 9.749,70	1,14 %	1,14 %

FONTE: O Autor (2018)

Nota-se que, por se tratar de um teste pequeno, os dois *solvers* atingiram a solução ótima em pouco tempo. A heurística, mesmo com tempo computacional baixo, conseguiu realizar um número considerável de iterações, com 1.217 iterações no teste com 2,77 s e mais de 11.300 iterações no teste com 150s. Ressalta-se ainda que no teste com 150s, que pode ser considerado um tempo de processamento baixo, o método heurístico apresentou uma solução apenas 1,14% acima do mínimo global do problema encontrado pelos *solvers*.

Buscando aumentar a complexidade, elaborou-se um segundo cenário, nomeado de Teste 2. Este possui 20 talhões e um único centro de demanda. Cada um de seus talhões possui três produtos florestais distintos e o relevo pode ser classificado como tipo 1 ou tipo 2. Foram consideradas três frentes de corte distintas para efetuar a colheita destes talhões, sendo que estas frentes possuem custos operacionais, custo de deslocamento e produtividades distintas. O horizonte de planejamento foi fixado em 7 dias e o centro apresenta uma demanda diária constante por cada produto florestal que pode ser colhido.

Este cenário pode ser considerado mediano e sua otimização já apresenta um custo computacional mais elevado. Quando foi implementado no *solver* LINGO, o modelo foi classificado como um modelo da classe PLIM e este cenário apresentou 23.643 variáveis, sendo 19.380 variáveis inteiras, além de 14.302 restrições para o modelo.

Semelhantemente ao cenário anterior, este também foi resolvido nos dois *solvers*, sendo implementado no LINGO e resolvido também no GUROBI, através de um arquivo de extensão .mps. O método heurístico também foi aplicado e a Tabela 7 apresenta uma comparação semelhante à tabela anterior.

TABELA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE MODELO EXATO E MÉTODO HEURÍSTICO NO CENÁRIO TESTE 2

	Tempo	Solução	GAP₁ (LINGO)	GAP₂ (GUROBI)
LINGO	157 s	\$ 20.770,42	0,00 %	0,00 %
GUROBI	6 s	\$ 20.770,42	0,00 %	0,00 %
Heurística	60 s	\$ 25.712,70	23,79 %	23,79 %
Heurística	120 s	\$ 23.962,60	15,37 %	15,37 %
Heurística	300 s	\$ 21.796,80	4,94 %	4,94 %
Heurística	600 s	\$ 21.013,80	1,17 %	1,17 %

FONTE: O Autor (2018)

Mais uma vez percebe-se o bom desempenho do modelo nos dois *solvers*, pois atingiram a solução ótima em pouco tempo. A heurística novamente se mostrou eficiente, pois em um tempo de processamento relativamente baixo (10 min) atingiu uma solução que esteve apenas 1,17% acima do mínimo global do problema encontrado pelos *solvers*.

Buscando uma situação mais próxima dos cenários resolvidos pelo método heurístico apresentado na tese, elaborou-se um terceiro cenário nomeado de Teste 3. Foram utilizados os mesmos dados do cenário Teste 2, mas fixando o horizonte de planejamento em 15 dias.

Quando implementado no *solver* LINGO, o modelo também foi classificado como PLIM, porém este cenário apresentou 36.603 variáveis, sendo 29.940 variáveis inteiras, além de 29.142 restrições para o modelo.

Da mesma forma, este cenário também foi resolvido nos dois *solvers*, LINGO e GUROBI. O método heurístico também foi aplicado e a Tabela 8 apresenta uma comparação entre as soluções encontradas.

TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE MODELO EXATO E MÉTODO HEURÍSTICO NO CENÁRIO TESTE 3

	Tempo	Solução	GAP₁ (LINGO)	GAP₂ (GUROBI)
LINGO*	17 h*	\$ 68.759,37*	0,00 %	23,92 %
GUROBI*	1 h*	\$ 61.249,02*	-10,92 %	10,39 %
GUROBI	5 h 17 min 46 s	\$ 55.485,41	-19,30 %	0,00 %
Heurística	300 s	\$ 80.732,20	17,41 %	45,50 %
Heurística	900 s	\$ 71.754,90	4,36 %	29,32 %
Heurística	1500 s	\$ 62.946,90	-8,45 %	13,45 %

*: Não é a solução ótima, mas a melhor solução encontrada no tempo descrito.

FONTE: O Autor (2018)

Este cenário já demonstra maior complexidade, exigindo mais esforço computacional para atingir a solução ótima. O *solver* LINGO, em 17 horas de processamento, não foi capaz de encontrar a solução ótima do problema. O *solver* GUROBI, em uma hora de processamento também não havia atingido a solução ótima, mas já tinha uma solução melhor que o outro *solver*, em tempo muito menor. O *solver* GUROBI foi capaz de encontrar uma solução ótima para o problema, porém foram necessárias mais de 5 horas de processamento.

Se comparamos o resultado do método heurístico, com 25 minutos de tempo de processamento, com o resultado do modelo exato, vemos que este ficou 13,45% acima do mínimo global. Porém, se compararmos com a melhor solução encontrada pelo GUROBI em uma hora de processamento, vemos que o método heurístico ficou apenas 2,77% acima deste valor.

5.3.2 Resultados dos Testes

Após realizar a comparação entre o desempenho do método heurístico e do modelo exato, para os dois *solvers*, com os testes preliminares, optou-se por realizar comparação semelhante utilizando o

Cenário 1, criado para o desenvolvimento do método heurístico. O horizonte de planejamento foi fixado em 15 dias.

Entendendo que o *solver* LINGO apresentou desempenho muito inferior ao *solver* GUROBI, utilizou-se o primeiro apenas para a construção do modelo e geração do arquivo de extensão .mps para que o problema fosse resolvido no GUROBI. Após a implementação do modelo exato, o problema envolvendo o Cenário 1 apresentou 195.003 variáveis, sendo 178.350 variáveis inteiras, e 135.942 restrições.

A Tabela 9 apresenta a comparação entre soluções encontradas pelo modelo exato, utilizando o *solver* GUROBI, e o método heurístico. Optou-se por utilizar o *solver* GUROBI duas vezes, sendo uma com limite de tempo de 25 minutos (tempo utilizado no método heurístico) e uma sem limite de tempo, a fim de buscar a solução ótima global do problema. A solução do método heurístico utilizada nesta comparação é a melhor solução encontrada nos 30 testes realizados para este cenário.

TABELA 9 – COMPARAÇÃO ENTRE MODELO EXATO E MÉTODO HEURÍSTICO NO CENÁRIO 1

	Tempo	Solução	GAP₁ (GUROBI*)	GAP₂ (GUROBI)
GUROBI*	1500 s*	\$ 60.414,09*	0,00 %	49,44 %
GUROBI	5 h 17 min 46 s	\$ 40.427,38	-33,08 %	0,00 %
Heurística	1500 s	\$ 42.776,50	-29,19 %	5,81 %

*: Não é a solução ótima, mas a melhor solução encontrada no tempo descrito.

FONTE: O Autor (2018)

Nota-se, mais uma vez, o bom desempenho do método heurístico. Quando comparado ao modelo exato, com o limite de tempo, ficou quase 30% abaixo da melhor solução encontrada por este modelo, em 25 minutos de processamento, porém quando comparado à solução ótima global ficou 5,81% acima desta solução. Cabe ressaltar que o *solver* demandou de mais de 5 horas de processamento para atingir a solução ótima, enquanto que o método heurístico atingiu sua solução em 25 minutos.

A Tabela 10 apresenta a comparação da solução ótima do modelo exato com a solução do método heurístico. Esta comparação vai além do

valor da solução e do tempo de processamento. Apresenta-se aqui uma descrição detalhada da solução obtida.

TABELA 10 – COMPARAÇÃO DETALHADA ENTRE AS SOLUÇÕES DO MODELO EXATO E DO MÉTODO HEURÍSTICO NO CENÁRIO 1

Resultados	Modelo Exato		Método Heurístico	
Solução	\$ 40.427,38		\$ 42.776,50	
Custo Operacional	\$ 5.255,55		\$ 5.288,70	
Custo de Movimentação	\$ 4.851,29		\$ 5.760,95	
Custo de Transporte	R\$ 30.320,54		R\$ 31.726,85	
Sequência de Corte	Talhão	Dia de Início	Talhão	Dia de Início
Frente 1	$t = 2$	$\delta = 1$	$t = 48$	$\delta = 1$
	$t = 31$	$\delta = 4$		
	$t = 49$	$\delta = 11$		
	$t = 3$	$\delta = 15$		
Frente 2	$t = 35$	$\delta = 1$	$t = 33$	$\delta = 1$
	$t = 6$	$\delta = 4$		
	$t = 44$	$\delta = 8$		
	$t = 34$	$\delta = 15$		
Frente 3	$t = 41$	$\delta = 1$	$t = 7$	$\delta = 1$
	$t = 17$	$\delta = 9$		
	$t = 21$	$\delta = 12$		
			$t = 18$	$\delta = 5$
			$t = 38$	$\delta = 11$

FONTE: O Autor (2018)

Observando a Tabela 10 pode-se concluir que as duas soluções são diferentes no sequenciamento da colheita e, conseqüentemente, serão diferentes no transporte da mesma. Percebe-se que, em ambos os casos, o custo do transporte representou a maior parcela da solução obtida. A tabela ainda mostra os três custos separados (operacional, movimentação e transporte) na solução do método heurístico, porém é perceptível ainda que o custo de movimentação foi maior que o custo operacional no método heurístico, ao contrário do modelo exato. Pode-se atribuir esta diferença de comportamento dos custos ao fato de que no método heurístico as frentes de corte se deslocam menos entre os talhões, trabalhando em talhões que exigem mais dias de colheita.

Continuando na ideia de comparação de resultados do método heurístico com o modelo matemático, optou-se por comparar as soluções encontradas para os 10 primeiros cenários gerados.

Com exceção do Cenário 7, todos os demais apresentaram o mesmo número de variáveis do Cenário 1 (195.003 variáveis, sendo 178.350 inteiras), além da mesma quantidade de restrições (135.942). Apenas o Cenário 7 apresentou um número de variáveis e restrições levemente inferior: 186.753 variáveis, sendo 170.700 inteiras; 135.574 restrições.

Nesta comparação, para o método heurístico, a melhor solução obtida dentro dos 30 testes realizados. Cabe ressaltar que, para o Cenário 6, apenas 12 dos 30 testes apresentaram soluções factíveis. Enquanto isso, para o modelo exato, apresenta-se a solução encontrada pelo *solver* GUROBI com limite de tempo computacional de 25 minutos (mesmo tempo do método heurístico). A Tabela 11, abaixo, apresenta tal comparação.

TABELA 11 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SOLUÇÕES DO MODELO EXATO E DO MÉTODO HEURÍSTICO

Cenário	Método Heurístico	Modelo Matemático	GAP
1	\$ 42.776,50	\$ 60.414,09	– 29,19 %
2	\$ 37.553,51	\$ 38.438,92	– 2,30 %
3	\$ 37.146,59	\$ 31.152,02	+ 19,24 %
4	\$ 35.386,66	\$ 50.460,76	– 29,87 %
5	\$ 35.440,47	\$ 54.593,43	– 35,08 %
6	\$ 95.762,47	\$ 140.208,66	– 31,70 %
7	\$ 47.494,69	\$ 37.616,78	+ 26,25 %
8	\$ 38.629,64	\$ 65.276,21	– 40,82 %
9	\$ 32.214,62	\$ 38.382,41	– 16,06 %
10	\$ 44.524,33	\$ 48.694,38	– 8,56 %

FONTE: O Autor (2018)

Nota-se, com a comparação apresentada nesta última tabela, que o modelo matemático tem dificuldade em otimizar os cenários propostos em baixo tempo computacional.

6 DISCUSSÃO

A Revisão de Literatura, apresentada no capítulo 3, mostrou que vários autores já apresentaram abordagens que aplicavam a metaheurística *Simulated Annealing* ao planejamento florestal (LOCKWOOD E MOORE, 1993; BOSTON E BETTINGER, 1999; RODRIGUES et al., 2004b; BARROS JUNIOR et al., 2012; BORGES, EID E BERGSENG, 2014; DONG et al., 2018). Porém, todos estes trabalhos apresentaram aplicações da metaheurística no planejamento tático, com restrições espaciais (integridade ou adjacências), quando o gestor deve decidir quais os talhões estarão aptos para a colheita, respeitando estas restrições. Nenhum dos trabalhos citados abordou a utilização desta metaheurística no planejamento operacional da colheita ou no transporte dos produtos colhidos.

Os resultados apresentados no capítulo anterior demonstram a eficiência do método heurístico. Apesar deste método não determinar a solução ótima para o problema, a Tabela 11 mostra que ele foi capaz de encontrar soluções melhores que o modelo matemático, em 8 dos 10 cenários, comparando apenas 25 minutos de processamento.

O modelo matemático, por sua vez, é capaz de determinar a solução ótima para os problemas tratados. Porém, o tempo computacional que o *solver* GUROBI necessitou para determinar tal solução variou em torno de 5 a 7 horas de processamento, para a maioria dos cenários testados. Entretanto, no caso do cenário 6, este tempo computacional chegou à 18 horas, 43 minutos e 38 segundos de processamento.

É possível destacar o comportamento das soluções obtidas de acordo com a variação do parâmetro de atualização da temperatura (α). Com base nos valores das Tabelas 6 e 7, conclui-se que o comportamento dos testes foi muito semelhante, independentemente do valor do parâmetro α utilizado.

Verifica-se que, para $\alpha = 0,99$, ocorreram em média 9,06 ciclos de temperatura e 126,56 iterações por teste, o que gera uma média de 13,97 iterações por ciclo de temperatura em cada teste. De forma semelhante,

para $\alpha = 0,95$, ocorreram em média 8,78 ciclos de temperatura e 128,91 iterações por teste, o que gera uma média de 14,69 iterações por ciclo de temperatura em cada teste. Enquanto que, para $\alpha = 0,90$, ocorreram em média 8,72 ciclos de temperatura e 129,76 iterações por teste, o que gera uma média de 14,88 iterações por ciclo de temperatura em cada teste. Nota-se que, em média, todos os testes realizaram em torno de 14 iterações por ciclos de temperatura em cada teste.

Já os valores da Tabela 3 demonstram que não há uma tendência de que um dos valores do parâmetro α apresente resultados melhores que os demais. A cada linha de comparação, o melhor resultado entre os três valores de α está destacado em negrito. Observando tais valores, nota-se que dos 81 cenários testados, em 24 cenários a melhor solução foi obtida com $\alpha = 0,99$, em 30 cenários a melhor solução foi obtida com $\alpha = 0,95$ e nos outros 27 a melhor solução foi obtida com $\alpha = 0,90$. Ou seja, não há proeminência de um dos valores de α sobre os demais.

Observando as Figuras 9, 10 e 11 verifica-se que, para todos os valores do parâmetro α e em todos os cenários, a melhor solução obtida tende a ser significativamente melhor que a primeira solução factível encontrada. Analisando a redução média da primeira solução factível encontrada para a melhor solução do cenário, verifica-se que, em média, essa redução foi de 28,23% para $\alpha = 0,99$, de 30,54% para $\alpha = 0,95$ e de 30,92% para $\alpha = 0,90$. Mais uma vez, percebe-se que o comportamento e os resultados obtidos pelo método proposto são muito semelhantes, independentemente dos valores do parâmetro α .

A fim de comprovar a validade estatística das comparações realizadas, os resultados foram agrupados em conjuntos de 10 testes realizados, onde estes testes foram realizados para um mesmo cenário e para um mesmo valor de α . Estes 243 conjuntos de 10 elementos foram submetidos ao teste de Kolmogorov-Smirnov e os resultados confirmaram que cada um destes conjuntos apresenta uma amostra proveniente de uma população com distribuição normal de probabilidade.

Os 243 conjuntos foram reagrupados em 81 novos conjuntos, com 30 elementos cada, agrupando os resultados de testes realizados para

um mesmo cenário, sendo 10 elementos de cada valor de α . Para cada um destes novos 81 conjuntos foi realizada uma ANOVA, com a finalidade de analisar se a mudança no valor de α foi capaz de produzir respostas significativamente diferentes.

Concluiu-se que, para um nível de significância de 5%, os valores de α não apresentam resultados substancialmente diferentes. Ou seja, as diferenças observadas nos valores das tabelas e gráficos acima se devem à natureza aleatória do método proposto.

7 CONCLUSÕES

Esta tese apresentou uma proposta de solução integrada para o problema de agendamento da colheita florestal e para o transporte dos produtos colhidos até os centros de demanda. Tal problema pode ser enquadrado no nível hierárquico operacional do planejamento florestal. As características dos talhões, das frentes de corte e do transporte dos produtos foram apresentadas e consideradas durante a otimização proposta.

A utilização da ferramenta de geração de cenários florestais se mostrou eficiente e capaz de produzir os cenários de testes, necessários para o desenvolvimento e avaliação do método heurístico que se desejava propor nesta tese.

O modelo matemático proposto e apresentado se mostrou capaz de resolver o problema integrado do agendamento da colheita e do transporte dos produtos florestais. O modelo foi classificado como um modelo PLIM e resolvido em dois *solvers* distintos. Os testes realizados comprovaram que, para cenários grandes, com horizonte de planejamento de 15 dias e algumas dezenas de talhões para colheita, o modelo necessitou de algumas horas de processamento para atingir a solução ótima do problema.

De acordo com os resultados apresentados e com a discussão realizada sobre estes, conclui-se que os testes demonstraram eficiência do método proposto. As tabelas que apresentam a quantidade de iterações e os ciclos de temperatura realizados dentro do intervalo de tempo determinado, demonstram que o método heurístico proposto realizou um número de iterações considerável. Os gráficos reforçam ainda essa eficiência, comparando a solução final encontrada com a primeira solução factível obtida pelo método, confirmando que no decorrer das iterações o método foi capaz de otimizar as soluções obtidas.

O tempo computacional para os testes foi estipulado em 25 minutos, o que o autor entendeu que é um tempo aceitável na prática do planejamento florestal operacional. Inclusive, como o método proposto

não apresenta a discussão sobre a previsão de incertezas durante o processo florestal (quebra de equipamento, falhas no transporte, falhas na produtividade, etc.), entende-se que este é um tempo razoável para refazer o planejamento, no caso de alguma intercorrência. Embora o planejamento possa ser realizado para um horizonte de 15 dias, o gestor pode refazer o planejamento diariamente, atualizando as informações do cenário florestal com os resultados do trabalho do dia anterior.

Desta forma, conclui-se que o método proposto é eficaz, produz resultados bons e é pertinente para o planejamento florestal. Cabe aos gestores das empresas florestais adaptarem o método proposto com os parâmetros da empresa e seus cenários florestais reais.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se:

- Incluir informações mais detalhadas sobre a frota de veículos envolvida no transporte dos produtos florestais;
- Aplicar o método proposto em cenários florestais reais, em parceria com empresas florestais, de modo a oferecer resultados melhores no planejamento da colheita e transporte destas empresas.

REFERÊNCIAS

AARTS, E.; KORST, J. **Simulated Annealing and Boltzmann Machines: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing**. 1ª ed. Reino Unido: John Wiley & Sons, 1989.

ANDERSSON, D. **Approaches to integrate strategic/tactical forest planning**. 29f. Thesis (Licentiate in Forest Resource Management and Geomatics) – University of Agricultural Sciences, Umeå, Suécia, 2005.

ANDRADE, V. C. L.; LEITE, H. G. Um método para quantificar multiprodutos de árvores individuais na unidade estere. **Revista Árvore**, Viçosa/MG, v. 22, n. 3, p. 299-306, 1998.

ARAÚJO, H. A. **Algoritmo Simulated Annealing**: Uma nova abordagem. 117f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2001.

ARCE, J. E. **Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte**. 136f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2000.

ARCE, J. E. **Planejamento Florestal Otimizado**. Colheita de Madeira – Mídia especializada em Operações Florestais. Disponível em: <http://colheitademadeira.com.br/noticias/planejamento_florestal_otimizado> Acesso em: 20/03/2015.

ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FRIEDL, R. A. Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. **Revista Árvore**, Viçosa/MG, v.28, n. 2, p. 207-217, 2004.

ASSUMPÇÃO, J. F. P. **Gerenciamento de empreendimentos da construção civil: modelo para planejamento estratégico da produção de edifícios**. 207f. (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Implementing Minimum area harvesting blocks in an optimized forest planning model. **Revista Árvore**, Viçosa/MG, v. 14, n. 1, p. 1-8, 2017.

BANHARA, J. R.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; SILVA, L. M. S.; NOBRE, S. R.; COGSWELL, A. Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e climáticas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba/SP, v. 38, n. 85, p. 85-95, 2010.

BARROS JUNIOR, A. A.; SILVA, G. F.; PEREIRA, G. W.; MELO, R. Aplicações de heurísticas para a solução de um problema de planejamento florestal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 44, 2012, Rio de Janeiro/RJ, **Anais...** p. 2430-2441.

BATEMAN, T. S.; SNELL, S. A. **Administração: construindo vantagem competitiva**. 1ª ed. São Paulo: Atlas, 1998.

BETTINGER, P.; BOSTON, K. Forest Planning Heuristics – Current Recommendations and Research Opportunities for s-Metaheuristics. **Forests**, Basel – Suíça, v. 8, n. 476, p. 1-10, 2017.

BORGES, J. F. **Seccionamento do fuste de *Pinus taeda* L. para obtenção do volume de madeira serrada, através da função de forma polinomial**. 91f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 1981.

BORGES, P.; EID, T.; BERGSENG, E. Applying simulated annealing using methods for the neighborhood search in forest planning problems. **European Journal of Operational Research**, Holanda, v. 233, p. 700-710, 2014.

BOSTON, K.; BETTINGER, P. An analysis of Monte Carlo integer programming, simulated annealing, and tabu search heuristics for solving spatial harvest scheduling problems. **Forest Science**, Bethesda – EUA, v. 45, n. 2, p. 292–301, 1999.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, K. **Forest management and economics: a primer in quantitative methods**. 1ª ed. New York: Macmillan, 1987.

CHICHORRO, J. F. **Análise estrutural e econômica de multiprodutos da madeira**. 241 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

CLUTTER, J.L. **Timber management: A quantitative approach**. 1ª ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1983.

CORRÊA, E. S. **Algoritmos Genéticos e Busca Tabu Aplicados ao Problema das P-medianas**. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2000.

CURTIS, F. H. Linear programming the management of a forest property. **Journal of Forestry**, Bethesda – EUA, v. 60, p. 611-616, 1962.

DAVIS, L.S.; JOHNSON, K.N. **Forest Management**. 3ª ed. New York: McGraw-Hill, 1987.

DEADMAN, M. W.; GOULDING, C. J. A method for assessment of recoverable volume by log types. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Nova Zelândia, v. 9, p. 225-239, 1979.

DONG, L.; BETTINGER, P.; QIN, H.; LIU, Z. Reflections on the number of independent solutions for forest spatial harvest scheduling problems: a case of simulated annealing. **Silva Fennica**, Helsinque - Finlândia, v. 52, n. 1, id 7803 (20 p.), 2018.

DYKSTRA, D.P. **Mathematical programming for natural resource management**. 1ª ed. New York: McGraw-Hill, 1984.

ENG, G.; DAELLENBACH, H. G.; WHITE, A. G. D. Bucking tree-length stems optimally, **Canadian Journal of Forest Research**, v. 16, p. 1030-1035, 1986.

EPSTEIN, R.; MORALES, R.; SERÓN, J.; WEINTRAUB, A. Use of OR Systems in the Chilean Forest Industries, **Interfaces**, Catonsville - EUA, v. 29, n. 1, p. 7-29, 1999.

EPSTEIN, R.; KARLSSON, J.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. Harvest Operational Models in forestry. In: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJORNDAL, T.; EPSTEIN, R.; MIRANDA, J. **Handbook of Operations Research in Natural Research**. 1ª ed. New York/NY – EUA: Springer Science, 2007. p. 365-377.

FAALAND, B.; BRIGGS, D. Log bucking and lumber manufacturing using dynamic programming. **Management Science**, Catonsville – EUA, v. 30, n. 2, p. 245-257, 1984.

FALÇÃO, A. O.; BORGES, J. G. Heurísticas para a integração de níveis estratégico e operacional da gestão florestal em problemas de grande dimensão. **Scentia Forestalis**, Piracicaba/SP, n. 63, p. 94-102, 2003.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Uso do algoritmo genético no planejamento florestal considerando seus operadores de seleção. **Cerne**, Lavras/MG, v. 15, n. 4, p. 460-467, 2009.

GRAZHDANI, D. Using a participatory multi-criteria approach for forest planning: A case study in Prespa Park. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOCIAL AND NATURAL SCIENCES, 1, 2017, Indonesia. **Book of proceedings...** Viena – Austria. p. 15-25.

GUNN, E. A. Some aspects of hierarchical production planning in forest management. In: SYMPOSIUM ON SYSTEMS ANALYSES IN FOREST RESOURCES, 1991, Charleston, South Carolina. **Proceedings...** Ashville, NC/USDA, Forest Service: Southeastern Forest Experiment Station, 1991. p. 54-62.

HAARA, A.; PYKÄLÄINEN, J.; TOLVANEN, A.; KURTTILA, M. Use of interactive data visualization in multi-objective forest planning. **Journal of Environmental Management**, EUA, v. 210, p. 71-86, 2018.

HAJEK, B. Cooling schedules for optimal annealing. **Mathematics of Operations Research**, Catonsville – EUA, v. 13, n. 2, p. 311-329, 1988.

HIROYASU, T.; MIKI, M.; OGURA, M. Parallel Simulated Annealing using genetic crossover. In: IASTED INTERNATIONAL CONFERENCE PARALLEL AND DISTRIBUTED COMPUTING AND SYSMTEMS, 12, 2000, Las Vegas, Nevada, EUA. **Proceedings...** 2000. p. 139-144.

HOF, J. **Coactive Forest management**. 1^a ed. London: Academic Press, 1993.

HOF, J.; BEVERS, M. **Apatial optimization for managed ecosystems**. 1^a ed. New York: Columbia University Press, 1998.

HOF, J. G.; JOYCE, L., A. A Mixed integer linear programming approach for spatially optimizing wildlife and timber in managed forest ecosystems. **Forest Science**, Bethesda – EUA, v. 39, n.4, p. 816-834, 1993.

IVERSON, D. C.; ALSTON, R. M. **The genesis of FORPLAN: a historical and analytical review of forest service planning models.** US Department of Agriculture, Forest Service, 1986. 31 p.

JOHNSON, K.N.; JONES, D.; DANIEL, B. **A user's guide to multiple use sustained yield scheduling calculation (MUSYC).** Fort Collins: Department of Agriculture, Forest Service, Timber Management, 1979. 242p.

JOHNSON, K.N.; SCHEURMAN, H.L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives: discussion and synthesis. **Forest Science**, Monograph 18, Bethesda – EUA, 31p., 1977.

KIRKPATRICK, S.; GELATT Jr. C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. **Science**, EUA, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983.

LAROZE, A., A linear programming, tabu search method for solving forest-level bucking optimization problems. **Forest Science**, Bethesda – EUA, v. 15, n. 1, p. 108-116, 1999.

LAROZE, A.; GREBER., B. Using Monte-Carlo simulation to generate rule-based bucking patterns. In: SYMPOSIUM ON SYSTEMS ANALYSIS AND MANAGEMENT DECISIONS IN FORESTRY, 1993, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. **Proceedings....** 1993. 10p.

LAROZE, A.; GREBER., B. Using tabu search to generate stand-level, rule-based bucking patterns. **Forest Science**, Bethesda – EUA, v. 43, n. 2, p. 157-169, 1997.

LEAK, W. B. **Estimating maximum allowable timber yields by linear programming.** US Department of Agriculture, Forest Service. 1964. 9 p. Research Paper NE-17.

LEE, F. H. A. **Parallel simulated annealing on a message-passing multi-computer.** 183f. Thesis (Doctorate in Electrical Engineering) – Utah State University, Logan, Utah, 1995.

LEUSCHENER, W.A. **Introduction to Forest Resource Management.** 1^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.

LOCH, G. V. **Uma nova abordagem no processo iterativo de melhoria de solução na resolução do problema de transporte**. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2014.

LOCKWOOD, C.; MOORE, T. Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. **Canadian Journal of Forest Research**, Canadá, v. 23, p. 468-478, 1993.

LOUCKS, F. H. Linear Programming the management of a forest property. **Journal of Forestry**, Bethesda – EUA, v. 60, n. 9, p. 611-616, 1962

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. (Org.). **Colheita florestal**. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 2002.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R.; YAMAJI, F. M. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Floresta**, Curitiba/PR, v. 36, n. 2, p. 169-182, 2006.

MALINOVSKI, R. A. **Otimização da Distância de Extração de Madeira com Forwarder**. 94f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu/SP, 2007.

MARQUES, A.; BORGES, J. G.; GONÇALVES, L.; ROMANO, M.; FERRINHO, M.; PIRES, J.; LÉ, J.; DIAZ, E.; KADOĞULLARI, A. Y. **Inovação no Planejamento Operacional Florestal**, Naturlink. 2008. Disponível em: <http://naturlink.pt/article.aspx?menuid=3&cid=3123&bl=1&viewall=true#Go_1> Acesso em: 21/02/2018.

MARQUES, A. F.; SOUSA, J. P.; RÖNNQVIST, M.; JAFE, R. Combining optimization and simulation tools for short-term planning of forest operations. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 29, n. 1, p. 166-177, 2014.

MAZZUCCO Jr., J. **Uma abordagem híbrida do problema da programação da produção através dos algoritmos Simulated Annealing e genético**. 125f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 1999.

MENDOZA, G. A.; BARE, B. B. A two-stage decision model for log bucking and allocation. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners – EUA, v. 36, n. 10, p. 70-74, 1986.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H.; TELLER, E. Equations of state calculations by fast computing machines. **The Journal of Chemical Physics**, EUA, v. 21, n. 6, p. 1087-1092, 1953.

MITCHELL, S. A. **Operational Forest Harvest Scheduling Optimization: A mathematical model and solution strategy**. 278f. Thesis (Doctorate in Engineering Science) – The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 2004.

MURPHY, G. Allocation of Stands and Cutting Patterns to Logging Crews Using a Tabu Search Heuristic. **International Journal of Forest Engineering**, v. 9, n. 1, p. 31-37, 1998.

NAUTIYAL, J. C.; PEARSE, P. H. Optimizing the Conversion to Sustained Yield - A Programming Solution. **Forest Science**, Bethesda – EUA, v. 13, n. 2, p. 131-139, 1967.

NAVON, D. I. **Timber RAM, a long range planning method for commercial timber lands under multiple use management**. USDA Forest Service, 1971. 22 p. Research paper PSW-70.

NOBRE, S. R. **A heurística da razão-R aplicada a problemas de gestão florestal**. 137f. Dissertação (Mestrado em Administração e Economia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG, 1999.

OGWENO, D. C. O. **Integrated optimization of operational and tactical planning for log production**. 178f. Thesis (Doctorate in Management Science Department) – University of Canterbury, Canterbury, New Zealand, 1995.

OLIVEIRA, E. B. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de *Pinus taeda* L., com critérios quantitativos para a avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. 152f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 1995.

OLIVEIRA, E. B.; OLIVEIRA, Y. M. M. SISPLAN – Sistema para manejo e análise econômica de florestas de pinus. In: CONGRESSO E MOSTRA DE AGRO INFORMÁTICA, 2000, Ponta Grossa/PR. **Anais...** 2000. 6p.

PANCEL, L. **Tropical forestry handbook**. 1ª ed. New York: Springer-Verlag, 1993.

PNEVMATICOS, S. M.; MANN, S. H. Dynamic programming in tree bucking. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners – EUA, v. 22, n. 2, p. 26-30, 1972.

QUINTERO-MÉNDEZ, M. A.; JEREZ-RICO, M. Heuristics forest planning model for optimizing timber production and carbon sequestration in teak plantations. **iForest**, Parma - Itália, v. 10, p. 430-439, 2017.

RODRIGUES, F.L.; LEITE, H.G.; ALVES, J.M. Sysflor – um sistema de suporte à decisão em planejamento florestal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 32, 2000. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG. **Anais...** 2000. p. 974-995.

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 255f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2001.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L. Solução de problemas de Planejamento Florestal com restrições de Inteira utilizando Busca Tabu. **Revista Árvore**, Viçosa/MG, v. 27, n. 5, p. 701-713, 2003.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L.; SILVA, G. F. Metaheurística Algoritmo Genético para solução de problemas de Planejamento Florestal com restrições de Integridade. **Revista Árvore**, Viçosa/MG, v. 28, n. 2, p. 233-245, 2004a.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A. S. Metaheurística Simulated Annealing para solução de problemas de Planejamento Florestal com restrições de Integridade. **Revista Árvore**, Viçosa/MG, v. 28, n. 2, p. 247-256, 2004b.

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.

RODRIGUES, M. A. P. **Problema do Caixeiro Viajante**: um algoritmo para resolução de problemas de grande porte baseado em busca local dirigida. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2000.

RODRIGUEZ, L. C. E., Gerenciamento da produção florestal. **Documentos Florestais**, Piracicaba/SP, v.13, p. 1-41, 1991.

RODRIGUEZ, L. C. E.; LIMA, A. B. N. P. M.; BUENO, A. C.; MARTINI, E. L. **Programação linear no planejamento florestal: uma aplicação prática**. *Silvicultura*, v. 11, n. 41, p. 163-168, 1986.

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**, EUA, v. 232, p. 11-40, 2015.

SANTANA, C. J. O. **Traçamento e alocação ótima de toras de eucalipto por geração de colunas e programação dinâmica**. 99f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2013.

SANTOS, P. A. V. H.; SILVA, A. C. L.; ARCE, J. E. Uma ferramenta para construção de cenários florestais. In: CLAUDIO LATIN-IBEROAMERICAN CONFERENCE ON OPERATIONS RESEARCH, 18, 2016, Santiago. **Proceedings...** Santiago, Chile, 2016. p. 819-826.

SESSIONS, J.; OLSEN, E.; GARLAND, J. Tree bucking for optimal stand value with log allocation constraints. **Forest Science**, Bethesda – EUA, v. 35, n. 1, p. 271–276, 1989.

SOARES, T. S.; VALE, A. B.; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa/MG, v. 27, n. 6, p. 811-820, 2003.

SOUZA, D. O. **Algoritmos genéticos aplicados ao planejamento do transporte principal de madeira**. 184f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2004.

STAPE, J. L. Planejamento global e normatização de procedimentos operacionais da talhadia simples em *Eucalyptus*. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba/SP, v. 11, n. 30, p. 51-62, 1997.

TAUBE NETTO, M. Um modelo de programação linear para planejamento de florestas de eucalipto. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro/RJ, v. 4, n. 1, p. 19-39, 1984.

TEIXEIRA, A. F.; SANTOS, H. N.; SILVA, G. F.; FREITAS, P. M. Algoritmos evolucionários multiobjetivos no planejamento do manejo florestal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE INFORMÁTICA APLICADA À AGROPECUÁRIA E À AGROINDÚSTRIA, 4, 2003, Porto Seguro/BA. **Anais...** 2003.

USDA Forest Service, **Spectrum User's Guide**. Ecosystem Management Analysis Center, Fort Collins, CO. 1995. 189p.

VELIZ, F. B.; WATSON, J. P.; WEINTRAUB, A.; WETS, R., J. B.; WOODRUFF, D. L. Stochastic optimization models in forest planning: a progressive hedging solution approach. **Annals of Operations Research**, EUA, v. 232, n. 1, p. 259-274, 2015.

VON GADOW, K.; BREDENKAMP, B.V. **Forest management**. Pretoria: Academica, 1992.

VOPENKA, P.; KASPAR, J.; MARUSAK, R. GIS tool for optimization of forest harvest-scheduling. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 113, p. 254-259, 2015.

WARE, G.O.; CLUTTER, J.L. A mathematical programming system for the management of industrial forests. **Forest Science**, Bethesda – EUA, v. 17, n. 3, p. 428-445, 1971.

WEI, R.; MURRAY, A. T. Spatial uncertainty in harvest scheduling. **Annals of Operations Research**, EUA, v. 232, p. 275-289, 2015

WEINTRAUB, A.; CHOLAKY, A. A hierarchical approach to forest planning. **Forest Science**, Bethesda – EUA, v. 27, p. 439–460, 1991.

WEINTRAUB, A.; GUITART, S.; KOHN, V. Strategic planning in forest industries. **European Journal of Operational Research**, Holanda, v. 24, p. 152-162, 1986.

WEINTRAUB, A.; JONES, G.; MAGENDZO, A.; MEACHAM, M.; KIRBY, M. A heuristic system to solve mixed integer Forest planning models. **Operations Research**, Catonsville – EUA, v. 42, n. 6, p. 1010-1024, nov./dez. 1994.

WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJORNDAL, T.; EPSTEIN, R. **Handbook of Operations Research in Natural Resources**. New York: Springer Science, 2007.

ZAGONEL, R. **Análise da densidade ótima de estradas de uso florestal em relevo plano de áreas com produção de *Pinus taeda***. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2005.

ZIZTLER, E. **Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications**. 122 f. Thesis (PhD in Computer Engineering and Networks Laboratory) – Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1999.