



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**JULYANA CRISTINA CÂNDIDO VIANA**

**MODELO DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS APLICADO AO  
PLANEJAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2017

**JULYANA CRISTINA CÂNDIDO VIANA**

**MODELO DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS APLICADO AO  
PLANEJAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais, na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Gilson Fernandes da Silva.

**JERÔNIMO MONTEIRO – ES**

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)  
Bibliotecária: Claudia Regina da Rocha Oliveira – CRB-6 ES-000576/O

---

V614m Viana, Julyana Cristina Cândido, 1991-  
Modelo de roteamento de veículos aplicado ao planejamento da colheita florestal / Julyana Cristina Cândido Viana. – 2017.  
66 f. : il.

Orientador: Gilson Fernandes da Silva.  
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Otimização matemática. 2. Florestas - Planejamento. 3. Colheita Florestal. I. Silva, Gilson Fernandes da. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. III. Título.

CDU: 630

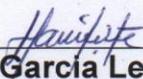
---

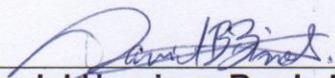
**MODELO DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS APLICADO AO  
PLANEJAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL**

**Julyana Cristina Cândido Viana**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 31 de Julho de 2017.

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Hélio Garcia Leite** (Examinador externo)  
Universidade Federal de Viçosa

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Daniel Henrique Breda Binoti** (Examinador externo)  
Universidade Federal do Espírito Santo

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva** (Orientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo

*À Maria passa na frente.*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela força e por colocar anjos na terra para me ajudarem nessa caminhada.

À minha mãe, Consola, meu maior exemplo de mulher guerreira, por todo amor e orações a mim dedicados. Ao meu pai, Luiz, por ser o meu porto seguro.

À minha vó Imaculada (*in memoriam*) por olhar por mim lá de cima.

À minha irmã, Jussara, e minhas primas, Júlia e Mariana, pela amizade e por se fazerem presentes mesmo longe.

Ao Romário, pelo carinho, paciência e companheirismo.

Ao meu orientador Gilson Fernandes, pela confiança em mim depositada, por todo o conhecimento repassado e pelas contribuições para a realização desse trabalho.

Ao Daniel Binoti, pela ajuda e sugestões para a conclusão desse trabalho. Agradeço também pela amizade formada e sábios conselhos.

Ao professor Helio Garcia, por me fazer apaixonar pelo Manejo Florestal e aceitar participar da minha defesa de dissertação.

À Harliany, Catherine, Sandra e Mariana, pelas noites de estudo, filmes, almoços, pedaladas e aventuras. Enfim por tornarem meus dias em “Jeromim” mais felizes.

Aos amigos do Laboratório de Manejo Florestal, pelos momentos e conhecimentos compartilhados.

À empresa Klabin, na pessoa de Diego Cezana, por disponibilizar os dados utilizados neste estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pela oportunidade de crescimento profissional e à CAPES pela bolsa de estudos.

## RESUMO

VIANA, Julyana Cristina Cândido Viana. **Modelo de roteamento de veículos aplicado ao planejamento da colheita florestal**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Gilson Fernandes da Silva.

A colheita é uma atividade de grande importância em empreendimentos florestais, dada a sua elevada participação no custo final da matéria-prima. O planejamento eficiente dessa atividade é essencial por permitir a otimização das operações e a redução dos custos. O objetivo desse trabalho foi propor um modelo matemático, tomando como base o problema de roteamento de veículos, para otimizar o planejamento da atividade de colheita florestal. O modelo visou reduzir os custos totais da colheita florestal, sob restrições de controle de estoque e distância média de transporte. O planejamento foi realizado para um horizonte de 1 ano, envolvendo a colheita de 200 talhões, destinados ao abastecimento de duas fábricas, uma localizada em Telêmaco Borba e outra em Ortigueira. A modelagem proposta foi capaz de determinar a melhor sequência de corte para reduzir os custos totais da colheita florestal. Além disso, o modelo se mostrou eficaz para manter o nível do estoque dentro de limites desejáveis e para não permitir uma grande variação da distância média de transporte. A inclusão da restrição de distância média de transporte ao modelo, implicou em um aumento de 2,17% nos custos totais de colheita.

**Palavras-chave:** Otimização, Planejamento florestal, Agendamento da colheita florestal.

## ABSTRACT

VIANA, Julyana Cristina Cândido Viana. **Vehicle routing model applied to forest harvest planning**. 2017. Dissertation (Master Degree in Forest Science) – Federal University Federal of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Adviser: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva.

Harvesting is an activity of great importance in forestry enterprises, due to its high participation in the final cost of the raw material. The efficient planning of this activity is essential as it allows the optimization of operations and the reduction of costs. The objective of this work was to propose a mathematical model, based on the vehicle routing problem, to optimize the planning of the forest harvesting activity. The model aimed to reduce the total costs of the forest harvest, under inventory control constraints and average transport distance. The planning was carried out for horizon of one year, involving the harvesting of 200 stands, for the supply of two mills, one located in Telêmaco Borba and another in Ortigueira. The proposed modeling was able to determine the best cutting sequence to reduce the total costs of the forest harvest. In addition, the model proved to be effective in keeping the stock level within desirable limits and not allowing a large variation in the mean transport distance. The inclusion of the mean transport distance restriction to the model, which implied a 2,17% increase in total harvesting costs.

**Keywords:** Optimization. Forest planning. Scheduling of the forest harvest.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estrutura da floresta destinada ao planejamento da colheita .....	29
Tabela 2 – Níveis de estoque mínimo e máximo (toneladas) .....	29
Tabela 3 – Exemplo de programação dos talhões .....	36
Tabela 4 – Madeira disponível (t) e (t/ha) em cada talhão da situação exemplo e produtividade da equipe de colheita (t/h) .....	36
Tabela 5 – Sequência de corte dos talhões, quantidade de madeira colhida, custos de colheita, deslocamento e transporte resultados da otimização do cenário 1 .....	42
Tabela 6 – Distância média de transporte e distância média de deslocamento no cenário 1 .....	43
Tabela 7 – Sequência de corte dos talhões, quantidade de madeira colhida custos de colheita, deslocamento e transporte resultados da otimização do cenário 2 .....	45
Tabela 8 – Distância média de transporte e distância média de deslocamento no cenário 2 .....	46
Tabela 9 – Sequência de corte dos talhões, quantidade de madeira colhida, custos de colheita, deslocamento e transporte resultados da otimização do cenário 3 .....	48
Tabela 10 – Distância média de transporte e distância média de deslocamento no cenário 3 .....	49
Tabela 11 – Valor de fitness apresentado para cada cenário, bem como o custo de colheita por tonelada colhida .....	51
Tabela 12 – Quantidade de madeira da floresta .....	61
Tabela 13 – Matriz de distâncias (km) .....	61
Tabela 14 – Custo de colheita .....	63
Tabela 15 – Custo de deslocamento .....	63
Tabela 16 – Custo de transporte .....	64
Tabela 17 – Valor de fitness do indivíduo 1 do problema exemplo .....	64
Tabela 18 – Fitness, probabilidade de escolha e intervalo na roleta de cada indivíduo do problema exemplo .....	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura geral do Algoritmo Genético. ....	21
Figura 2 – Representação da seleção por roleta russa para uma população de três indivíduos. ....	22
Figura 3 – Grafo $G = (V, \mathcal{E}, C)$ . ....	23
Figura 4 – Relação em O PRV e suas variações. ....	26
Figura 5 – Área de estudo. ....	28
Figura 6 – Exemplo de cromossomo.....	35
Figura 7 - Comportamento do estoque de madeira no pátio ao longo do horizonte de planejamento para o cenário 1. ....	44
Figura 8 – Comportamento do estoque de madeira no pátio ao longo do horizonte de planejamento para o cenário 2. ....	47
Figura 9 – Comportamento do estoque de madeira no pátio ao longo do horizonte de planejamento para o cenário 3. ....	50
Figura 10 – Alocação dos talhões na sequência de corte nos meses. ....	51
Figura 11 – Representação da roleta russa. ....	65

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
2.1	Colheita florestal .....	13
2.2	Pesquisa Operacional .....	14
2.2.1	Programação Linear (PL) .....	15
2.2.2	Programação Linear Inteira (PLI) .....	18
2.2.3	Métodos heurísticos .....	19
2.2.4	Problema de Roteamento de Veículos .....	22
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>28</b>
3.1	Descrição dos dados .....	28
3.2	Modelo Matemático .....	30
3.3	Algoritmo Genético .....	34
3.3.1	Função de aptidão.....	37
3.3.2	População inicial .....	38
3.3.3	Operadores genéticos .....	39
3.3.4	Seleção dos indivíduos.....	39
3.3.5	Critério de parada.....	39
3.4	Descrição dos Cenários.....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE</b> .....	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O planejamento é uma etapa essencial à gestão e sobrevivência de um empreendimento. Planejar consiste em definir metas e objetivos, bem como as atividades que deverão ser realizadas para melhor alcançá-los (BETTINGER, et al. 2009).

No setor florestal, de acordo com o nível de decisão, horizonte temporal, especificidade e a amplitude de efeitos, o planejamento pode se dividir em três níveis hierárquicos: estratégico, tático e operacional (BEZERRA, 2014).

A colheita é uma atividade importante no planejamento de uma empresa florestal, uma vez que é uma das atividades mais relevantes na definição de custos finais da matéria-prima. Segundo Malinovski et al. (2014), a colheita e o transporte florestal em florestas equiâneas representam, aproximadamente, 60 a 70% dos custos totais da madeira posta em fábrica.

O planejamento eficiente dessa atividade é essencial aos gestores da área, visando a otimização das operações e a redução de custos (MACHADO et al., 2014). Além disso, permite organizar e racionalizar os recursos, reconhecer as restrições, identificar a demanda e regular o abastecimento. O planejamento tático da colheita envolve decisões como: quais povoamentos cortar, quando cortar, quais frentes de colheita irão ser alocadas em cada povoamento, em que sequência os povoamentos serão colhidos e qual será o destino da madeira (MITCHELL, 2004; MALINOVSKI, 2010).

Nas empresas florestais em que a madeira pode ser destinada para mais de uma fábrica, o planejamento da colheita pode influenciar significativamente o fluxo de transporte da madeira e, conseqüentemente, os custos (SOUZA, 2004). Segundo Machado et al. (2009), a distância é um dos fatores que mais afeta o custo de transporte, e esse varia de acordo com a localização da fábrica em relação às áreas de produção da matéria-prima.

Tendo em vista o grande número de variáveis envolvidas, o planejamento da colheita florestal é considerado uma atividade complexa, fazendo-se necessário o uso de ferramentas mais elaboradas que auxiliem na tomada de decisão. Machado e Lopes (2014), destacam a pesquisa operacional (PO) e o

Sistema de Informações (SIG) como ferramentas eficientes, pois permitem considerar todo o conjunto de variáveis envolvidas na atividade de colheita.

A pesquisa operacional envolve o uso de modelos matemáticos para obter a melhor solução para problemas reais, desde os simples aos mais complexos (DYKSTRA, 1984). Vários trabalhos tem abordado o uso de técnicas de PO no planejamento da colheita florestal.

Souza (2004), propôs um modelo de algoritmo genético para determinar o período de intervenção das equipes de corte nos pontos de produção e o fluxo de madeira entre os pontos de produção e as fábricas, com a finalidade de minimizar os custos de colheita e transporte. Banhara et al. (2010), elaboraram um modelo de programação linear para o agendamento otimizado da colheita de madeira de eucalipto sob restrições operacionais, espaciais e climáticas. Stang (2016), desenvolveu um modelo matemático para o agendamento da colheita dentro de um horizonte de planejamento de cinco anos, visando minimizar a distância média de transporte de madeira e a dispersão dos blocos de colheita. Cezana (2013), avaliou a viabilidade de se utilizar o problema de roteamento de veículos (PRV) no planejamento da colheita florestal. No modelo proposto pelo autor, foram adicionadas ao PRV restrições da capacidade da frente de colheita e demanda de matéria-prima.

O uso de PRV é uma técnica potencial ao planejamento da colheita. Modelos dessa natureza são adequados para planejar sequência ótima de visitas, de forma a atender a demanda de cada cliente, considerando diferentes tipos de restrições.

Apesar dos bons resultados encontrados por Cezana (2013) ao utilizar o PRV no agendamento da colheita florestal, o modelo proposto pelo autor não levou em consideração restrições inerentes ao problema de colheita como: distância entre os povoamentos a serem colhidos, produtividade das equipes de colheita em função da volumetria ( $m^3/ha$ ) dos povoamentos e comportamento do estoque de madeira, que são fundamentais para a aplicação eficaz do modelo em situações reais. Nesse contexto, é necessário o desenvolvimento de modelos que representem a realidade encontrada nas empresas florestais da melhor forma possível.

O objetivo deste estudo foi propor um modelo matemático para otimizar o planejamento da atividade de colheita florestal, visando: minimizar o custo da colheita florestal por meio da aplicação do PRV, regular os níveis de estoque de madeira no pátio das fábricas, reduzir a variação da distância média de transporte entre os meses, e propor cenários a fim de verificar o desempenho do modelo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Colheita florestal

No Brasil, em meados da década de 70, o termo “exploração florestal” referia-se apenas a utilização de florestas inequiâneas. Com a maturação das florestas equiâneas, foi necessária a adaptação do termo para a nova realidade (MALINOVSKI, 2008). A partir do VII Seminário de Atualização sobre Sistemas de Colheita de Madeira e Transporte Florestal, realizado em 1992, a expressão colheita de madeira passou a ser atribuída à florestas equiâneas, e a expressão exploração florestal à florestas inequiâneas (MALINOVSKI; MALINOVSKI, 1998). Segundo esses autores, o termo colheita como referência às florestas equiâneas é mais adequado, por condizer mais com a realidade das operações, sugerindo um impacto menos negativo que a expressão exploração florestal.

Machado et al. (2014) definem colheita como um conjunto de operações que envolvem a preparação e a extração da madeira até o local de transporte. Malinovski e Malinovski (1998) e Malinovski et al. (2014), definem colheita florestal como sendo todas as atividades compreendidas desde a derrubada da árvore até a madeira posta no ponto de utilização.

A colheita florestal abrange as operações de corte (derrubada, desgalhamento, traçamento), extração, carregamento, transporte e descarregamento (MALINOVSKI; MALINOVSKI 1998; MALINOVSKI et al., 2008; PARISE, 2005; PUKKI,2006). No entanto, para alguns autores, compreende apenas as etapas de corte, extração e carregamento; não englobando o transporte e descarregamento (MACHADO et al., 2014; PEREIRA, 2015).

A colheita é uma atividade crucial no planejamento de qualquer empreendimento florestal, principalmente do ponto de vista técnico e econômico, dada a sua elevada participação no custo final do produto (MACHADO; LOPES, 2014).

Os métodos mais comuns para o planejamento de colheita, principalmente nos níveis hierárquicos tático e operacional, podem ser classificados como: método imitativo, no qual se busca subsídios em outros empreendimentos, baseando-se em modelos semelhantes e opiniões de outras

peessoas; método de tentativa, apoia-se em fatos e atos semelhantes em situações passadas, em situações inéditas, a decisão é tomada intuitivamente ou por suposições; método científico, fundamentado em condições lógicas, por meio de dados coletados em situações reais e extrapolados para novas situações (MACHADO; LOPES 2014). Ainda, de acordo com esses autores, o uso de métodos científicos é importante na definição da melhor maneira para se conduzirem as operações, diante de diversas circunstâncias.

Ferramentas mais elaboradas de planejamento permitem controlar simultaneamente um grande número de variáveis e realizar um planejamento de forma eficiente. Entre essas ferramentas, Machado e Lopes, (2014) destacam o uso de sistemas computacionais, tidos como alternativas eficientes, pois utilizam técnicas de otimização, SIG e informática. Segundo esses autores, no Brasil, apenas algumas técnicas de pesquisa operacional e SIG vêm sendo utilizadas como ferramentas para a solução de problemas específicos de colheita florestal.

## **2.2 Pesquisa Operacional**

A pesquisa operacional surgiu durante a Segunda Guerra Mundial para a solução de problemas de natureza logística, tática e de estratégia militar, quando um grupo de cientistas foi convocado para decidir sobre a alocação mais eficiente dos recursos limitados, marcando a primeira atividade formal desse campo de estudo (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

O sucesso do uso da PO no empreendimento bélico despertou o interesse na sua aplicação em outras áreas e motivaram os cientistas a desenvolverem pesquisas relevantes nesse campo, resultando em avanços no estado da arte. Dois fatores foram fundamentais para o rápido crescimento da pesquisa operacional. O primeiro foi o progresso nas técnicas de PO, como por exemplo o desenvolvimento do método simplex para solucionar problemas de programação linear, proposto por George B. Dantzig em 1947. O segundo fator foi a revolução computacional, com a proliferação dos microcomputadores e o aumento em sua velocidade de processamento (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

A PO consiste na utilização de métodos científicos (modelos matemáticos e algoritmos computacionais) para a tomada de decisão (BELFIORE; FÁVERO,

2012), buscando uma melhor solução para o problema encontrado (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Paula Júnior (1998) define pesquisa operacional como o conjunto de modelos e algoritmos destinados a determinar o melhor curso das ações que visam garantir o funcionamento ótimo de sistemas, sob restrições de recursos escassos.

Face ao seu caráter multidisciplinar, as contribuições da PO envolvem áreas de engenharia de produção, matemática aplicada, ciência da computação, gestão de negócios e recursos florestais (BELFIORE; FÁVERO, 2012). Entre as técnicas de PO com aplicações no manejo de recursos florestais, destaca-se a programação linear (PL), programação inteira (PI), programação com múltiplos objetivos (PMO), programação dinâmica (PD) e as heurísticas.

Segundo Silva (2015), algumas das primeiras aplicações da PO no ramo florestal incluem os trabalhos de Curtis (1962) e Ware e Clutter (1971). Outros estudos envolvendo o uso de PO no setor florestal vem sendo desenvolvidos: Binoti (2010), Miranda (2003), Piassi (2011), Rodrigues (1997, 2001) e Silva (2001), desenvolveram pesquisas com PO na regulação de florestas equiâneas; Meneguzzi (2011) no planejamento de atividades de inventário; Arce (1997), Berger et al. (2003), Malinovski (2010) e Seixas e Widmer (1983) no transporte florestal e Banhara et al. (2010), Castro (2007), Dong et al. (2015), Galatsidas et al. (2013), Gomide (2009), Legues et al. (2007), Nascimento (2014), Öhman e Eriksson, 2010, Smaltschinski, Seeling e Becker, (2012) e Silva (2015) na colheita florestal.

### 2.2.1 Programação Linear (PL)

A palavra programação, nesse caso, trata-se de um sinônimo de planejamento e o adjetivo linear significa que todas as funções do modelo são necessariamente funções lineares (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Segundo esses autores, a programação linear envolve o planejamento de atividades para alcançar um resultado ótimo, ou seja, que entre todas as alternativas viáveis, atinja melhor o objetivo especificado (de acordo com o modelo matemático).

Os modelos de PL visam maximizar ou minimizar uma função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições lineares que podem ser expressa em

equações ou inequações (LEUSCHNER, 1984). Um modo de representar a formulação é apresentado a seguir (GOLDBARG; LUNA, 2005):

$$\text{Max ou Min } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \{ \leq, =, \geq \} b_i \quad (2)$$

$$x_j \geq 0 \quad (3)$$

Em que:

$z$  é a função objetivo;

$x_j$  são as variáveis de decisão, principais ou controláveis,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;

$a_{ij}$  é a constante ou coeficiente da  $i$ -ésima restrição da  $j$ -ésima variável,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;

$b_i$  é o termo independente ou quantidade de recursos disponíveis da  $i$ -ésima restrição,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;

$c_j$  é a constante ou coeficiente da  $j$ -ésima variável da função objetivo,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Para que um determinado sistema possa ser representado por meio da programação linear, o mesmo deve satisfazer as seguintes pressuposições (HILLIER; LIEBERMAN, 2006):

- *Aditividade*: o valor total da função objetivo ou de cada função de restrição de um modelo de programação linear é expresso pela soma das contribuições individuais de cada variável de decisão.
- *Proporcionalidade*: A contribuição de cada variável de decisão ao valor da função objetivo  $Z$  e às restrições do modelo, é proporcional ao valor de cada variável de decisão.

- *Divisibilidade*: Em um modelo de programação linear, as variáveis de decisão podem assumir quaisquer valores, inclusive valores fracionários, desde que satisfaçam as restrições do modelo e as não-negatividade.
- *Certeza*: O valor atribuído a cada um dos parâmetros do modelo de programação linear (coeficientes da função objetivo, os coeficientes das restrições e os termos independentes) é assumido como uma constante conhecida.

Para a resolução de problemas de programação linear, diversos algoritmos ou métodos de solução podem ser aplicados, sendo o algoritmo simplex, desenvolvido por George B. Dantzig em 1947, o mais conhecido (BELFIORE; FÁVERO, 2012). O método utiliza-se de procedimentos de álgebra linear que, quando programado em computador, pode resolver problemas com milhares de variáveis e restrições (BUONGIORNO; GILLES, 2003).

A programação linear é uma poderosa ferramenta de planejamento sendo aplicada em uma variedade de problemas florestais e industriais, na regulação da produção florestal, e no planejamento econômico florestal (LEUSCHNER, 1984).

Segundo Ribeiro (2007), as justificativas comumente encontradas para o uso da PL no gerenciamento de recursos florestais são:

- É uma das poucas técnicas que podem ser utilizadas para lidar com problemas de grande porte, comumente encontrados nessa área;
- A PL é uma técnica de otimização, podendo ser usada para satisfazer certas exigências legais;
- Existe considerável experiência acumulada na área de modelagem e manejo de recursos naturais em vários países;
- Existem programas para microcomputadores e interfaces específicas para determinadas classes de problemas.

Devido a sua característica de divisibilidade, a PL muitas vezes conduz a soluções não-inteiras, que apesar de ser uma solução viável do ponto de vista matemático, pode não se aplicar na prática. No setor florestal, são inúmeras as situações que exigem a solução com variáveis inteiras. Como forma de superar o fracionamento das variáveis de decisão, utiliza-se os modelos de programação linear inteira.

### 2.2.2 Programação Linear Inteira (PLI)

O problema de programação linear inteira consiste em um problema de programação linear, com uma ou mais restrições adicionais, de que uma ou mais variáveis decisórias devem assumir valores inteiros (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Os problemas de PLI se dividem em Programação Linear Inteira Pura (PLI), Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e Programação Linear Inteira com variáveis binárias (0-1) ou Programação Binária. Nos problemas de PLI, todas as variáveis de decisão devem assumir valores inteiros. Na PLIM, apenas algumas variáveis de decisão estão sujeitas a restrição de singularidade, podendo as demais variáveis assumir valores contínuos. Já na Programação Linear Inteira com variáveis binárias, os valores das variáveis estão restritos a 0 ou 1 (DYKSTRA, 1984).

De acordo com Hillier e Lieberman (2006), os problemas com restrições binárias talvez sejam os mais importantes, pois envolvem decisões nas quais as únicas escolhas possíveis são “sim” e “não”. No setor florestal, variáveis de decisão desse tipo incluem atividades como "cortar ou não determinado talhão"; “passar ou não por uma rota”, “adotar ou não a alternativa de manejo”.

Os métodos de solução exatos para os problemas de PLI mais aplicados são o *branch and bound* e o *cutting plane* (BETTINGER et al., 2009).

No entanto, alguns problemas, como por exemplo os de natureza combinatória, apresentam tamanha complexidade que pode se tornar impossível encontrar uma solução ótima em tempo factível (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Esses problemas são classificados como NP-hard pois não podem ser resolvidos em tempo polinomial (BELFIORE; FÁVERO, 2012). Nessas situações, uma boa solução viável pode ser obtida com a aplicação de algoritmos aproximativos, como as heurísticas e meta-heurísticas (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

### 2.2.3 Métodos heurísticos

A palavra heurística é derivada do grego *heriskein* que significa descobrir ou achar (GOLDBARG; LUNA, 2005). As heurísticas podem ser definidas como um procedimento de busca guiada pela intuição, por regras e ideias, que visam alcançar uma boa solução, utilizando um esforço computacional considerado razoável (BELFIORE; FÁVERO, 2012; BETINGER et al., 2008). Existe uma grande possibilidade desse método encontrar uma excelente solução viável para o problema em questão, porém não há qualquer garantia da otimalidade da solução (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Segundo esses autores, apesar de não ser possível afirmar sobre a qualidade da solução obtida, quando bem elaborado, o método heurístico é capaz de gerar uma solução próxima ao ótimo (ou concluir pela inexistência de uma solução).

Para Betingler et al.(2008), existem dois motivos principais pelos quais utilizam-se as heurísticas: a capacidade de incorporar relacionamentos quantitativos que não são facilmente descritos por meio de equações lineares, e a necessidade de uma solução para um problema complexo em tempo razoável.

A partir da evolução das ideias heurísticas, surgiram as meta-heurísticas. Nas meta-heurísticas há uma combinação de procedimentos de busca e estratégias de alto nível, como intensificação e diversificação, buscando escapar de ótimos locais a fim de encontrar soluções muito próximas do ótimo global (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

As meta-heurísticas se tornaram uma das mais importantes técnicas da pesquisa operacional, sendo seu papel lidar com problemas que são muito grandes e complexos de serem resolvidos por algoritmos exatos (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). No manejo dos recursos naturais, destacam-se as meta-heurísticas Simulação de Monte Carlo, *simulated annealing*, busca tabu, e algoritmos genéticos (BETTINGER et al., 2009).

#### Algoritmos Genéticos (AG)

Os AG foram desenvolvidos por John Holland na década de 1970 e ganharam popularidade com Goldberg, ao solucionar um complexo problema de transmissão de gasoduto (GOLDBERG, 1989). O método é inspirado na teoria

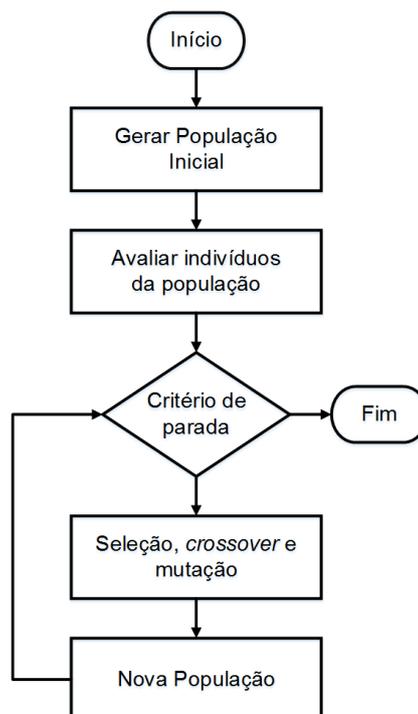
da evolução de Charles Darwin, em que os indivíduos mais adaptados ao meio se reproduzem mais e tem mais chances de passar seus genes para a próxima geração (LINDEN, 2008).

Na terminologia dos AG, um indivíduo (cromossomo) representa uma solução para o problema em questão, e o conjunto de soluções compõe a população. Cada cromossomo apresenta os seguintes elementos: gene, alelo, *locus* e *fitness*. Os genes são os componentes do cromossomo; os alelos referem-se aos possíveis estados de um atributo do problema; o *locus* indica a n-ésima posição do atributo no cromossomo e o *fitness* é a medida de avaliação do indivíduo, normalmente associada ao valor da função objetivo para uma dada solução (YU; GEN, 2010). O *fitness* funciona como um indicador do potencial de sobrevivência e reprodução dos indivíduos ao longo das gerações. Indivíduos que não atendem as restrições impostas pelo problema em questão podem sofrer penalidade, diminuindo seu *fitness* e seu potencial de sobrevivência, podendo ser excluídos da população (RODRIGUES, 2001).

O AG inicia o processo de otimização com uma população inicial formada por um conjunto de indivíduos, que por meio de operações de seleção, recombinação (*crossover*) e mutação, vão evoluindo e gerando novos indivíduos. A qualidade de cada indivíduo como solução do problema é medida por uma função de avaliação, chamada de *fitness* ou função de aptidão (LINDEN, 2008). O processo evolutivo continua até que um critério de parada seja atendido, e eventualmente ter encontrado uma boa solução para o problema em questão.

A estrutura geral do algoritmo é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura geral do Algoritmo Genético.

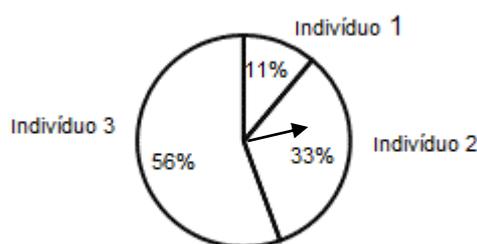


Fonte: Adaptado de Binoti, (2010).

A seleção refere-se a escolha de indivíduos (pais) na população para a reprodução, que dará origem a uma nova geração de indivíduos (filhos). O objetivo da seleção é ajustar os indivíduos na população com a expectativa de que seus descendentes, por sua vez, tenham ainda melhor aptidão (MITCHELL, 1996).

Um dos principais métodos de seleção é a roleta russa, com referência na maioria dos trabalhos de AG propostos na literatura (RODRIGUES, 2001). Na seleção por roleta russa, cada indivíduo é associado a uma porção da roleta proporcional à sua aptidão. A roleta é girada  $n$  vezes, em que  $n$  é o número de indivíduos da população. Em cada rotação, o indivíduo sob o marcador da roda é selecionado para estar no grupo de pais para a próxima geração (BASHIR; SALIH; HASAN, 2015). Assim, aqueles indivíduos com melhor aptidão, que receberam maior fatia na roleta, apresentam uma maior expectativa de sobrevivência (Figura 2)

Figura 2 – Representação da seleção por roleta russa para uma população de três indivíduos.



Como esse método de seleção é dependente do *fitness* dos indivíduos, a existência de “super indivíduos” no início do processo, pode levar a uma convergência prematura, uma vez que os melhores indivíduos são selecionados mais de uma vez, provocando uma redução da diversidade (MITCHELL, 1996). Segundo Gomide (2009), uma forma de mitigar essa falha, é impedir a seleção repetida do mesmo indivíduo, realizando o sorteio sem reposição.

Uma vez selecionados os indivíduos pais, o operador de *crossover* permite a obtenção de novos indivíduos (filhos) a partir da combinação (cruzamento) dos cromossomos dos pais (GOLDBARG; LUNA, 2005). A probabilidade de cruzamento dos dois indivíduos pais é conhecida como taxa de *crossover* (YU; GEN, 2010).

Juntamente com o *crossover*, a mutação é responsável pela evolução do AG. O operador de mutação escolhe aleatoriamente a posição de um ou mais genes, e altera o valor de seus alelos. A mutação evita a estagnação do algoritmo em mínimos locais, de modo a explorar todo o espaço de busca e encontrar melhores soluções (SIVANANDAM; DEEPA, 2008).

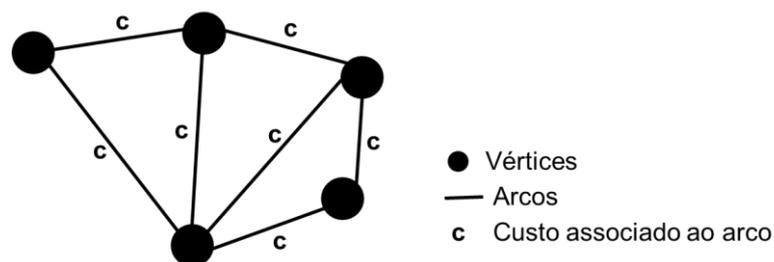
#### 2.2.4 Problema de Roteamento de Veículos

A formulação do problema de roteamento de veículos foi introduzida pela primeira vez por Dantzig e Ramser (1959) como uma generalização do clássico problema do caixeiro viajante (PCV) (PILLAC et al., 2013; WANG et al., 2016). No PCV, um vendedor visita um conjunto de cidades e retorna a origem, passando apenas uma vez por cada cidade, percorrendo a menor distância possível (LARSEN, 2000; MCCARL; SPREEN, 2011). Quando adicionada uma

restrição de capacidade ao problema do múltiplo caixeiro viajante, dá-se origem ao PRV (BOCHTIS E SØRENSEN, 2009).

O PRV pode ser definido como um grafo  $G = (V, \mathcal{E}, C)$ , em que  $V = \{v_0, \dots, v_n\}$  é o conjunto de vértices;  $\mathcal{E} = \{(v_i, v_j) | (v_i, v_j) \in v_2, i \neq j\}$  o conjunto de arcos; e  $C = (c_{ij})(v_i, v_j) \in \mathcal{E}$  uma matriz de custo definida sobre  $\mathcal{E}$ , representando distâncias, tempos de viagem ou custos de viagem (Figura 3).

Figura 3 – Grafo  $G = (V, \mathcal{E}, C)$ .



O vértice  $v_0$  representa o depósito, enquanto os demais vértices  $v$  representam os clientes (ou pedidos) que precisam ser atendidos (EKSIOGLU; VURAL; REISMAN, 2009; LAPORTE et al., 2000; PILLAC et al., 2013). O problema consiste em encontrar um conjunto de rotas, com partida e término do depósito, de tal forma que cada nó seja visitado uma única vez, as demandas de todos os nós sejam atendidas e respeitado o limite de capacidade de cada veículo, enquanto minimiza o custo total da viagem (caminho mais curto, minimizar a quantidade de veículos etc.) (CARIC; GOLD, 2008; LAPORTE et al., 2000).

Uma formulação do problema, apresentada por Toth e Vigo (2002) é descrita a seguir:

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{V_0\} \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{V_0\} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = K \quad (7)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = K \quad (8)$$

$$\sum \sum x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \quad (10)$$

em que:

$i, j$  : clientes e depósitos;

$c_{ij}$ : distância ou os custos de sair de  $i$  e ir até  $j$ ;

$x_{ij}$ : variável de decisão,  $x_{ij}=1$ , se o cliente  $i$  é visitado imediatamente antes do  $j$ ,  $x_{ij}=0$  caso contrário;

$K$ : conjunto de veículos;

$V$ : conjunto de vértices em que:

- $V_0$  refere-se ao depósito;
- $V \setminus \{0\}$ , o conjunto de clientes;

$r(S)$ : número mínimo de veículos necessários para atender a demanda de todos os clientes do conjunto  $S$

A função objetivo (4) minimiza o custo do deslocamento dos veículos. As restrições (5) e (6) garantem que cada nó seja visitado uma única vez. As restrições (7) e (8) indicam, respectivamente, que cada veículo deverá sair e entrar no depósito apenas uma vez. A restrição chamada de capacidade de corte (9) faz uma relação entre a solução e a capacidade dos veículos. Finalmente, a restrição (10) garante que as variáveis de decisão sejam binárias.

Essa formulação, no entanto, não impede a formação de sub-rotas. Uma forma de eliminar as sub-rotas é adicionando a seguinte restrição ao modelo:

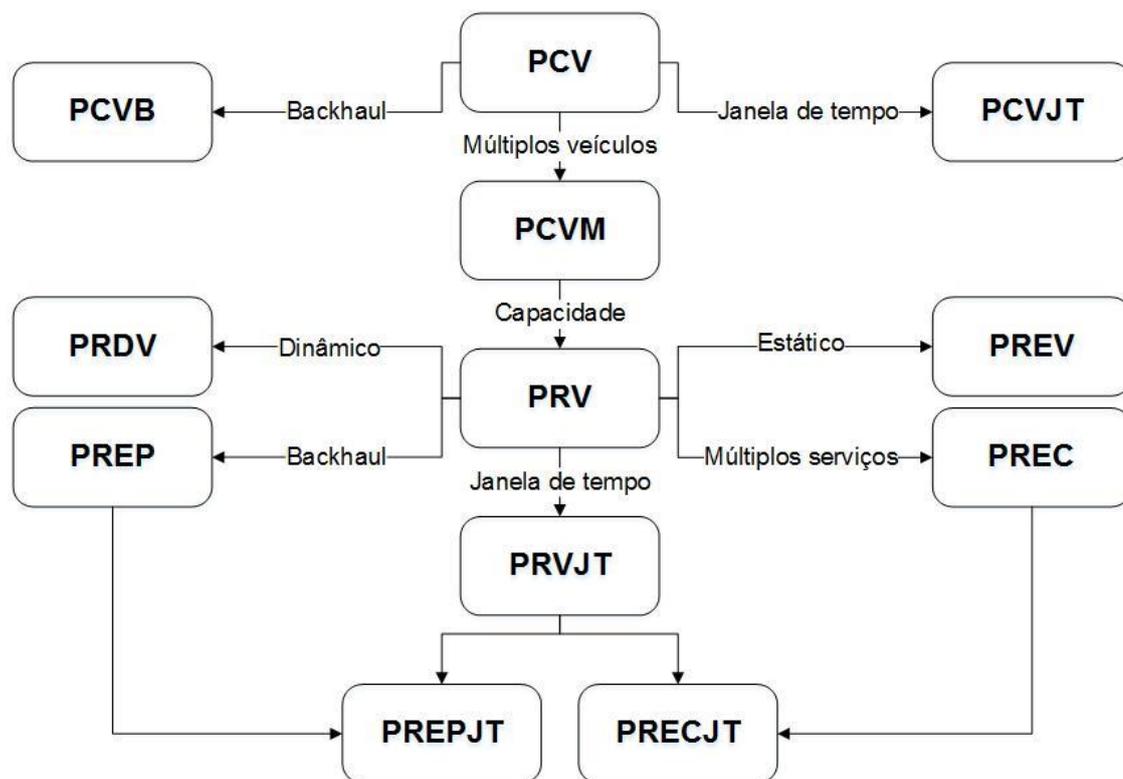
$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset N \quad (11)$$

em que:

|S| representa o número de vértices do subgrafo G.

Devido às restrições encontradas em situações reais, variações do PRV foram desenvolvidas para modelar esses problemas. Um exemplo seria a restrição de que cada cliente deve ser atendido dentro de uma determinada janela de tempo (Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo – PRVJT). Além disso, em alguns casos, a possibilidade de que os clientes irão retornar algumas mercadorias deve ser considerado (Problema de Roteamento com Entrega e Coleta – PREC) e que todas as entregas devem ser feitas em cada rota antes que qualquer coleta possa ser feita (Problema de Roteamento Entrega Prioritária – PREP). Finalmente, na prática, os pedidos de serviço podem muitas vezes ser sequenciados no tempo, com tempos estocásticos entre as chegadas. Além disso, alguns elementos de entrada do problema podem ser uma variável aleatória (Problema de Roteamento Estocástico de Veículos – PREV) ou os elementos do problema podem mudar durante o processo de tomada de decisão (Problema de Roteamento Dinâmico de Veículos – PRDV) (BOCHTIS; SØRENSEN, 2009). A Figura 4 mostra as conexões entre o PRV e suas derivações.

Figura 4 – Relação em O PRV e suas variações.



Fonte: adaptado de Bochtis e Sørensen (2009).

O PRV é um problema de otimização combinatória sendo considerado difícil de ser resolvido computacionalmente. Desse modo, métodos exatos de solução se tornam inviáveis para instâncias de grande porte, requerendo a utilização de métodos heurísticos/meta-heurísticos (SOSA; GALVÃO; GANDELMAN, 2007).

O desenvolvimento de algoritmos, juntamente com os avanços na capacidade de processamento computacional, permitiram grandes avanços na abordagem de PRV refletindo em um crescimento exponencial da sua literatura (EKSIÖGLU; VURAL; REISMAN, 2009). Dentro do campo PRV, os nomes dos pesquisadores que aparecem com maior frequência são: Gilbert Laporte, Michel Gendreau, Christian Prins, Richard F. Hartl e Christos D. Tarantilis.

O uso do problema de roteamento de veículos no planejamento e na execução de atividades em campo, como é o caso das atividades inerentes à agricultura e a área florestal, é bem recente (BOCHTIS; SØRENSEN, 2010).

Na agricultura, Ali, Verlinden e Oudheusden (2009) propuseram o uso do PRV para determinar as melhores rotas para colheitadeiras; Basnet et al. (2006) implementaram a PCV para o agendamento de colheita em várias fazendas, levando em conta a sequência e o tempo de viagem entre as fazendas; Bochtis e Sørensen(2009, 2010) aplicaram o PRV para a gestão da frota agrícola.

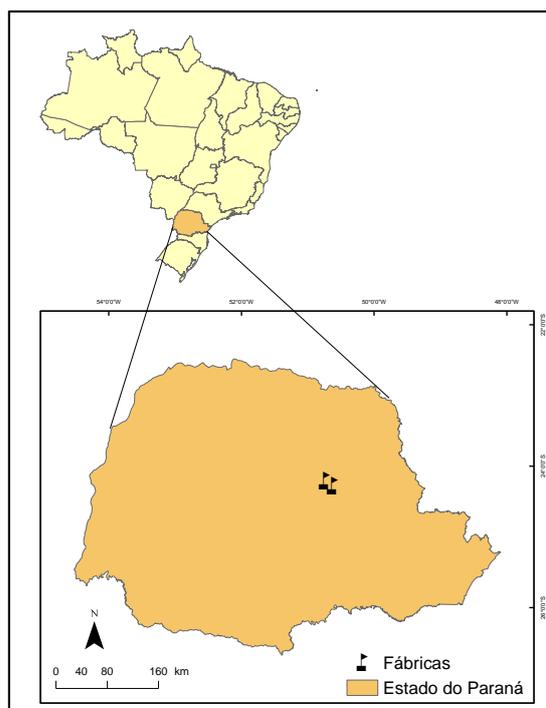
Na área florestal, Cezana (2013) utilizou o PRV no agendamento da colheita florestal; Haad (2015) aplicou modelos de roteamento para planejar as operações de inventário florestal urbano e Meneguzzi (2011) empregou PRV para o planejamento de atividades de inventário florestal.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição dos dados

O modelo foi gerado e testado com dados fornecidos pela Klabin S.A. unidade florestal localizada no estado do Paraná (Figura 5).

Figura 5 – Área de estudo.



A unidade possui plantios de eucalipto e pinus destinados a produção de celulose e comercialização de toras de madeira para serrarias e laminadoras. A matéria-prima destinada a produção de celulose abastece a demanda de duas fábricas, uma localizada em Telêmaco Borba (Unidade Monte Alegre) e outra em Ortigueira (Unidade Puma).

Foi realizado um planejamento para o horizonte de 1 ano visando atender a demanda de matéria-prima das duas fábricas. Para fins de planejamento, foram considerados apenas os plantios de eucalipto que possuíam seu volume 100% destinados a produção de celulose, totalizando 200 talhões.

A base florestal, de acordo com características edáficas, climáticas, sociais, ambientais, econômicas e de logística é dividida em unidades de produção, ou talhões.

As principais características do povoamento são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estrutura da floresta destinada ao planejamento da colheita

Idade	Talhões		Área		Quantidade de madeira		Produtividade
	Frequência	%	ha	%	T	%	T/ha
4	26	13,0%	519,78	15,5%	93397	11,5%	193,44
5	114	57,0%	1755,31	52,4%	350751	43,2%	199,57
6	14	7,0%	226,18	6,8%	74389	9,2%	314,74
7	20	10,0%	534,15	15,9%	182432	22,5%	336,53
8	16	8,0%	262,57	7,8%	97074	12,0%	362,25
13	1	0,5%	14,75	0,4%	4413	0,5%	299,21
14	1	0,5%	8,78	0,3%	1960	0,2%	223,27
17	6	3,0%	25,25	0,8%	6894	0,8%	273,06
37	1	0,5%	2,60	0,1%	301	0,0%	115,65
41	1	0,5%	1,43	0,0%	149	0,0%	104,43
Total	200	100%	3350,79	100,0%	811760	100,0%	235,47

Um grande desafio no planejamento é a regulação do estoque de madeira, de modo a ser o suficiente para atender a demanda da fábrica e ao mesmo tempo não exceder a capacidade do pátio. Os níveis de estoque mínimo e máximo para os pátios de cada uma das fábricas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Níveis de estoque mínimo e máximo (toneladas)

Pátio	Monte Alegre	Puma
Limite mínimo	2.100	3.600
Limite máximo	160.000	200.000

Para a formulação do modelo, considerou a colheita sendo realizada por duas equipes, configurados para sistema *full-tree* (*feller-buncher* e *skidder*). A produtividade da colheita (m<sup>3</sup>/hora) foi estimada em função da volumetria da floresta (m<sup>3</sup>/ha), por meio da seguinte equação (SCHETTINO; MINETTE; SOUZA, 2015):

$$\text{Ln produtividade (m}^3\text{/hora)} = 4,687838 - \frac{122,732}{\text{volume (m}^3\text{/ha)}} \quad (12)$$

Para conversão da unidade toneladas para m<sup>3</sup> e, m<sup>3</sup> para toneladas, utilizou-se um fator igual a 1,150 e 0,868, respectivamente (SBS - Fatos e Números do Brasil Florestal, 2008).

Assim como a produtividade do maquinário, o custo de colheita também é influenciado pela volumetria da floresta, sendo o custo de colheita (US\$/m<sup>3</sup>) obtido a partir da seguinte equação (SCHETTINO; MINETTE; SOUZA, 2015):

$$\text{Ln custo (US$/m}^3\text{)} = -0,216877 + \frac{54,38101}{\text{volume (m}^3\text{/ha)}} \quad (13)$$

Para a conversão de dólar (US\$) para real (R\$), foi utilizada uma taxa cambial de 3,15.

Todo transporte da madeira colhida no talhão até as fábricas é realizado pelo modal rodoviário. O custo de transporte por quilometragem foi dado de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Custo (R\$)} = 0,0856 * \text{distância (Km)} + 1,6181 \quad (14)$$

Para o deslocamento de um módulo de colheita entre talhões, foi utilizado um valor de custo de R\$ 37/hora.

Na base cartográfica, os plantios encontram-se divididos em talhões, sendo cada talhão representado por um polígono. Para a obtenção da matriz de distâncias, foi considerado o ponto central de cada polígono, e calculada a menor distância entre os polígonos, utilizando o *software* ArcGis 10.

### 3.2 Modelo Matemático

No PRV, o veículo visita um conjunto de clientes uma única vez, e retorna a origem, buscando sempre minimizar o custo da viagem. Aplicando o PRV na

colheita florestal, os veículos são representados pelas equipes de colheita e os clientes pelos talhões a serem colhidos. Um diferencial neste caso é que o maquinário das frentes de colheita permanece no campo durante todo o processo. Desse modo, as equipes não retornam ao talhão de origem ao final do processo de roteirização.

### 3.2.1 Função objetivo

A função objetivo visa minimizar o custo da colheita e transporte florestal no período de um ano.

$$\min Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T c_{i,j,k,p,t} x_{i,j,k,p,t} \quad (15)$$

em que  $c_{i,j,k,p,t}$  é o custo, em R\$, de colher o talhão  $j$  pela equipe de colheita  $k$ , após a colheita do talhão  $i$ , e transportar a madeira para o pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ ;  $x_{i,j,k,p,t}$ , variável de decisão que assume o valor 1 caso o talhão  $j$  seja colhido pela equipe de colheita  $k$ , após a colheita do talhão  $i$ , e destinado ao pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ , e assume o valor 0 caso contrário;  $I$  e  $J$ , o número total de talhões;  $K$  o número total de equipes de colheita;  $P$ , o número de fábricas;  $T$ , horizonte de planejamento.

Os coeficientes da função objetivo foram obtidos pela soma dos custos de colheita, deslocamento entre talhões e transporte até as fábricas, sendo:

$cc_{j,k,t}$  é o custo de colheita (R\$) do talhão  $j$  pela equipe  $k$  no período  $t$ .

$cd_{i,j,t}$  é o custo de deslocamento da equipe de colheita do talhão  $i$  até o talhão  $j$  no período  $t$ .

$ct_{j,p,t}$  é o custo de transporte (R\$) do talhão  $j$  até o pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ .

Assim, o custo, em (R\$), de colher o talhão  $j$  pela equipe de colheita  $k$ , após a colheita do talhão  $i$ , e transportar a madeira para o pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ , pode ser expresso como:

$$C_{i,j,k,p,t} = CC_{j,k,t} + cd_{i,j,t} + ct_{j,p,t}$$

Todos os custos mencionados tiveram seus valores corrigidos a uma taxa de juros de 8,75% ao ano.

### 3.2.2 Restrições

#### Restrição de singularidade

A restrição de singularidade garante que durante todo o horizonte de planejamento cada talhão seja cortado uma única vez, por uma única equipe de colheita e a madeira enviada apenas para uma fábrica.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T x_{i,j,k,p,t} = 1 \quad j=1,2,3,4,\dots,J \quad (16)$$

#### Restrições de partida

Essa restrição define o talhão que cada equipe de colheita iniciará sua rota. No presente trabalho, considerou-se as equipes de colheita 1 e 2 partindo do talhão 1 e 2, respectivamente.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P x_{i,j,k,p,t} \quad i=1,2 ; k=i; t=1 \quad (17)$$

#### Restrição de capacidade das equipes de colheita

Esta restrição garante que a quantidade de madeira programada para colheita para cada frente ao longo do ano não seja maior que sua capacidade total.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T g_{i,j,k} x_{i,j,k,p,t} \leq 365 \quad k=1,2 \quad (18)$$

em que  $g_{i,j,k}$  são os dias necessários para a frente de colheita  $k$  colher o talhão  $j$  após o talhão  $i$

### Restrição de controle do estoque

As restrições (19) e (20) asseguram que os estoques no pátio de cada fábrica respeitem os níveis de estoque mínimo e máximo, respectivamente.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T v_{j,k,p,t} x_{i,j,k,p,t} - \sum_{t=1}^T Dem_{p,t} + E_{p,t} \leq Emax_{p,t} \quad \forall p; \forall t \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T v_{j,k,p,t} x_{i,j,k,p,t} - \sum_{t=1}^T Dem_{p,t} + E_{p,t} \geq Emin_{p,t} \quad \forall p; \forall t \quad (20)$$

Em que  $v_{j,k,p,t}$  é o volume de madeira (toneladas) colhido no talhão  $j$  pela frente de colheita  $k$  destinado ao pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ ;  $x_{i,j,k,p,t}$  é a variável de decisão que assume o estado 1, caso o talhão  $j$  seja colhido pela equipe de colheita  $k$  destinado ao pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ , e o estado 0, caso contrário;  $Dem_{p,t}$  é a demanda da fábrica  $p$  no período  $t$ ;  $E_{p,t}$  é o estoque de madeira no pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ ;  $Emax_{p,t}$  é limite máximo do estoque de madeira no pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ ;  $Emin_{p,t}$  é limite mínimo do estoque de madeira no pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ .

O estoque de madeira no pátio da fábrica p no período t é dado pelas seguintes equações:

$$E_{p,t} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T v_{j,k,p,t-1} X_{i,j,k,p,t-1} - Dem_{p,t-1} + E_{0p} \quad \forall p ; t=2 \quad (21)$$

$$E_{p,t} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T v_{j,k,p,t-1} X_{i,j,k,p,t-1} - Dem_{p,t-1} + E_{p,t-1} \quad \forall p ; \forall t \neq 2 \quad (22)$$

### Restrição de distância média de transporte

No presente trabalho, assumiu-se que a distância média dos talhões colhidos até a fábrica, durante os meses, não deve variar mais que 20%. As equações (23) e (24) garantem que essa restrição seja atendida.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \bar{D}_{j,k,p,m} X_{i,j,k,p,t} \leq 1,2 \cdot \bar{D}_{j,k,p,h} \quad \forall p; m=1,2,3,\dots,12 \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \bar{D}_{j,k,p,m} X_{i,j,k,p,t} \geq 0,8 \cdot \bar{D}_{j,k,p,h} \quad \forall p; m=1,2,3,\dots,12 \quad (24)$$

Em que  $\bar{D}_{i,k,p,m}$  corresponde à distância média entre os talhões j colhidos pelas equipes de colheita k até o pátio da fábrica p no mês m;  $\bar{D}_{i,k,p,h}$  à distância média entre os talhões j colhidos pelas equipes de colheita k até o pátio da fábrica p no horizonte de planejamento de 1 ano, h.

### 3.3 Algoritmo Genético

O AG foi implementado em uma rotina computacional utilizando o ambiente de programação *Visual Basic for Applications* em conjunto com o

*Software Excel*. Os testes com o algoritmo foram efetuados em um computador Intel Core i5 1.60 GHz, e com 6 GB de memória RAM.

Na terminologia dos AG, cada indivíduo ou cromossomo é constituído por uma sequência de genes, representando uma solução para o problema em questão e cada gene equivale a um talhão ( $j$ ). O comprimento do cromossomo é definido pelo número de talhões que serão cortados no horizonte de planejamento. Na Figura 6 é apresentado um exemplo de cromossomo.

Figura 6 – Exemplo de cromossomo.

1	5	2	4	3
---	---	---	---	---

Para que os genes dos cromossomos representassem as variáveis do modelo de PLI, foi feita uma decodificação do cromossomo, estabelecendo os valores da variável binária de decisão  $x_{i,j,k,p,t}$ . O índice  $i$  é determinado em função da posição do gene  $g$ . No cromossomo da Figura 6, por exemplo, para o terceiro gene ( $g=3$ ), tem-se o talhão número dois ( $i=2$ ).

As informações utilizadas pelo algoritmo de decodificação do cromossomo foram:

- o volume de madeira, em toneladas, disponível para colheita no talhão  $i$ , no período  $t$ ;
- a produtividade da frente de colheita  $k$  em função do volume/ha de madeira disponível no talhão  $i$ ;
- a matriz de distância.

A seguir é apresentado um exemplo da aplicação do algoritmo de decodificação do cromossomo. Considere um cenário com 5 talhões, uma equipe de colheita e um horizonte de 10 períodos. Na Tabela 3, estão os talhões  $j$  que serão colhidos pela equipe de colheita  $k$  no período  $t$  e destinado a fábrica  $p$ . Os campos indicam os coeficientes  $c_{i,j,k,p,t}$  das variáveis de decisão binária  $x_{i,j,k,p,t}$  que mudaram de estado (assumiram valor 1).

Tabela 3 – Exemplo de programação dos talhões

	Período									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Talhão	1	1	5	3	3	2	2	2	4	4
Fábrica	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1

A oferta de madeira, em toneladas, de cada talhão e a produtividade das equipes de colheita são apresentadas na Tabela 4:

Tabela 4 – Madeira disponível (t) e (t/ha) em cada talhão da situação exemplo e produtividade da equipe de colheita (t/h)

	Talhão				
	1	2	3	4	5
Madeira disponível (t)	2721	4115	1800	1723	1145
Madeira disponível (t/ha)	250,06	260,88	138,09	276,43	217,47
Produtividade das equipes(t/h)	61,53	62,63	43,53	64,08	57,71

No talhão 1 a quantidade de madeira disponível (t/ha) é 250,06, multiplicando pelo fator de conversão 1,150 (t  $\rightarrow$  m<sup>3</sup>) tem-se 287,57 (m<sup>3</sup>/ha). Ao aplicar a equação (13), encontramos uma produtividade da frente de colheita para o talhão 1 igual a 70,88 m<sup>3</sup>/h. Multiplicando pelo fator de conversão 0,868 (m<sup>3</sup>  $\rightarrow$  t) chegamos a uma produtividade de 61,53 t/h.

Dividindo a quantidade de madeira disponível (2721) pela produtividade da frente de colheita (61,53), temos o número de horas necessárias para colher todo o talhão (44,22). Considerando que as equipes de colheita trabalham 24 horas/dia, são necessários 1,84 dias.

Além do tempo gasto para colheita, tem-se o tempo gasto para a equipes de colheita se deslocarem entre os talhões.

Considerando que uma equipe de colheita se desloca de um talhão para outro a uma velocidade média de 2,5 km/hora, temos que, ao deslocar do talhão 1 para o talhão 5, uma distância de 10 km, são necessárias 4 horas, o que equivale a 0,17 dia de viagem.

O talhão 1 ocupa a primeira posição do cromossomo, indicando que esse será o primeiro talhão a ser colhido. Considera-se também que esse será o ponto de partida da equipe de colheita. Desse modo, nessa situação, o índice  $i$  assume um valor fictício que chamaremos de  $o_k$ , sendo desconsiderada a distância de deslocamento de  $o_k$  até o talhão  $j$ . Desta forma, os valores iniciais de  $i, j, k, p$  e  $t$  são  $o_k, 1, 1, 2$  e  $1$ , respectivamente.

A frente de colheita inicia suas atividades no talhão 1, período 1, necessitando de 2 períodos (1,84 dias) para colher o talhão. Desse modo, as variáveis binárias  $x_{o_k,1,1,2,1}$  e  $x_{o_k,1,1,2,2}$  passam a ter valor 1. No próximo período ( $t=3$ ), a equipe já colheu todo talhão 1, passando então para o próximo talhão ( $i=5$ ), que é determinado pela posição do próximo gene ( $g=2$ ) no cromossomo. São necessários 0,17 dias para a equipe de colheita se deslocar do talhão 1 para o talhão 5, e 0,82 dias para colher o talhão 5, então a variável de decisão  $x_{1,5,1,1,3}$  assume valor igual a 1. Ao final do período ( $t=3$ ), todo talhão 5 foi colhido. Desse modo, passa-se para o próximo período ( $t=4$ ) e assim sucessivamente, até o final do horizonte de planejamento. No exemplo, as seguintes variáveis assumiram valor igual a 1:  $x_{o_k,1,1,2,1}, x_{o_k,1,1,2,2}, x_{1,5,1,1,3}, x_{5,3,1,1,4}, x_{5,3,1,1,5}, x_{3,2,1,2,6}, x_{3,2,1,2,7}, x_{3,2,1,2,8}, x_{2,4,1,1,9}, x_{2,4,1,1,10}$ .

### 3.3.1 Função de aptidão

O desempenho dos indivíduos é avaliado segundo uma função de aptidão ou *fitness*. A função de aptidão normalmente se baseia na aplicação de penalidades à função objetivo quando a restrição é violada. No presente trabalho, a função objetivo visa minimizar o custo de colheita e transporte, as penalidades impostas referem-se à variação do estoque de madeira acima ou abaixo do desejado e à variação da distância média entre os meses maior que 20%. A função de *fitness* é apresentada a seguir:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T c_{i,j,k,p,t} x_{i,j,k,p,t} + \alpha \left( \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sigma_{p,t} \right) + \beta \left( \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \omega_{j,p,m} \right) \quad (25)$$

Em que  $Z$  é o valor da função de fitness;  $c_{i,j,k,p,t}$  é o custo de colheita (R\$) do talhão  $j$  pela equipe de colheita  $k$ , após a colheita o talhão  $i$ , e transportar a madeira para o pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ ;  $x_{i,j,p,k,t}$ , variável de decisão que assume o valor 1 caso o talhão  $j$  seja colhido pela equipe de colheita  $k$ , após a colheita do talhão  $i$ , e a madeira transportada para o pátio da fábrica  $p$  no período  $t$ , e assume o valor 0 caso contrário;  $I$  e  $J$ , o número total de talhões;  $K$  o número total de equipes de colheita;  $P$ , o número de fábricas;  $T$  o período total do horizonte de planejamento;  $\sigma$ , quantidade de madeira em estoque que extrapola os limites mínimo e máximo de estoque;  $\omega$ , variação da distância média acima do desejado;  $M$ , total de meses;  $\alpha$  e  $\beta$ , coeficiente de penalidade associados a cada restrição.

Os conjunto de regras (26) e (27) estabelecem as penalidades que são aplicadas a função objetivo de acordo com o nível dos estoques e variação da distância média, respectivamente.

$$\begin{aligned} \sigma_{p,t} &= E_{\min,p,t} - E_{p,t} \text{ se } E_{\min,p,t} > E_{p,t} & \forall p \\ \sigma_{p,t} &= E_{p,t} - E_{\max,p,t} \text{ se } E_{p,t} > E_{\max,p,t} & \forall p \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \sigma_{p,t} &= E_{\min,p,t} - E_{p,t} \text{ se } E_{\min,p,t} > E_{p,t} \\ \sigma_{p,t} &= E_{p,t} - E_{\max,p,t} \text{ se } E_{p,t} > E_{\max,p,t} \end{aligned}} \right\} (26)$$

$$\begin{aligned} \omega_{j,p,m} &= 0,8 \cdot \bar{D}_{j,k,p,h} - \bar{D}_{j,k,p,m} \text{ se } \bar{D}_{j,k,p,m} < 0,8 \cdot \bar{D}_{j,k,p,h} & \forall m \\ \omega_{j,p,m} &= \bar{D}_{j,k,p,m} - 1,2 \cdot \bar{D}_{j,k,p,h} \text{ se } \bar{D}_{j,k,p,m} > 1,2 \cdot \bar{D}_{j,k,p,h} & \forall m \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \omega_{j,p,m} &= 0,8 \cdot \bar{D}_{j,k,p,h} - \bar{D}_{j,k,p,m} \text{ se } \bar{D}_{j,k,p,m} < 0,8 \cdot \bar{D}_{j,k,p,h} \\ \omega_{j,p,m} &= \bar{D}_{j,k,p,m} - 1,2 \cdot \bar{D}_{j,k,p,h} \text{ se } \bar{D}_{j,k,p,m} > 1,2 \cdot \bar{D}_{j,k,p,h} \end{aligned}} \right\} (27)$$

### 3.3.2 População inicial

A população é formada por um conjunto de indivíduos que representam um conjunto de soluções em determinado instante. A população inicial é o ponto de partida do algoritmo genético.

No presente trabalho, a população inicial foi constituída de 30 indivíduos gerados aleatoriamente, atendendo as restrições (16), (17) e (18).

### 3.3.3 Operadores genéticos

Os operadores genéticos garantem a evolução dos indivíduos gerando novas populações de indivíduos melhorados. Os operadores genéticos utilizados foram o *crossover* e a mutação.

Na operação de *crossover*, dois indivíduos da população são selecionados (pais) e cruzados entre si para gerar dois novos indivíduos (filhos). Utilizou-se o *crossover* de múltiplos pontos.

O operador de mutação confere diversidade à população evitando a convergência prematura. Na mutação, genes aleatórios possuem seus valores alterados, permitindo a criação de um novo indivíduo. A taxa de mutação de cada indivíduo da população foi igual à 3%.

### 3.3.4 Seleção dos indivíduos

O operador de seleção escolhe os indivíduos da população que irão se reproduzir, direcionando o processo de busca para as melhores regiões. Utilizou-se o método de roleta russa, em que a probabilidade do indivíduo ser sorteado é proporcional ao seu fitness. Para evitar a perda da diversidade da população e conseqüentemente uma convergência prematura, foi realizado o sorteio sem reposição.

### 3.3.5 Critério de parada

O critério de parada determina um momento onde se considera a melhor solução da população como sendo uma solução aceitável para o problema. O critério de parada adotado foi: após o AG encontrar uma solução na *i*-ésima iteração e ela permanecer como a melhor solução por 300 iterações, considerou-se que o algoritmo convergiu.

### **3.4 Descrição dos Cenários**

A fim de verificar a qualidade do modelo, foram propostos três cenários:

#### **Cenário 1**

O cenário 1 é o modelo original, tem como função objetivo minimizar o custo total da colheita florestal, utilizando todas as restrições descritas anteriormente.

#### **Cenário 2**

No cenário 2, é retirada do modelo proposto no cenário 1 a restrição de distância média de transporte. O objetivo foi verificar o efeito da ausência dessa restrição na variação da distância de transporte e como isso reflete nos custos.

#### **Cenário 3**

No cenário 3, houve uma mudança na função objetivo, que ao invés de minimizar o custo total de colheita, passou a minimizar o custo de deslocamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do problema de roteamento de veículos no agendamento da colheita florestal do problema proposto resultou numa explosão combinatória na ordem de bilhões de variáveis de decisão. Diante da complexidade computacional do problema, a sua solução pelo método exato se tornou inviável, adotando-se como método de solução o AG.

Na literatura, pode-se encontrar diversos trabalhos aplicando o AG para resolver problemas de planejamento florestal, verificando-se que este algoritmo foi capaz de produzir soluções eficientes (RODRIGUES, 2001; SOUZA, 2004; GOMIDE, 2009; BINOTI 2010). Soluções eficientes também foram encontradas por Baker e Ayechev (2003) e Heinen e Osório (2006) ao aplicar o AG para resolver problemas de roteamento de veículos.

O AG foi aplicado no presente trabalho visando encontrar uma solução eficaz para o problema, não sendo um objetivo avaliar diferentes parametrizações, nem a eficiência do algoritmo. Desse modo, a parametrização utilizada nesse trabalho foi baseada em valores reportados na literatura.

A seguir são apresentados os resultados dos cenários propostos:

### **Cenário 1**

O primeiro cenário refere-se ao problema original, que tem como objetivo minimizar o custo total de colheita, sob restrições de variação de estoque e distância média de transporte, para o horizonte de planejamento de um ano.

A otimização desse cenário resultou em um custo total da colheita de R\$ 10.794.916,74 correspondente a colheita de 180 talhões e disponibilização de 730.957 toneladas de madeira.

Na Tabela 5 são apresentados a sequência de corte dos talhões, o volume colhido e os custos de colheita, deslocamento e transporte.

Tabela 5 – Sequência de corte dos talhões, quantidade de madeira colhida, custos de colheita, deslocamento e transporte resultados da otimização do cenário 1

Mês	Sequência de corte		Quantidade de madeira	cc	cd	ct
	Equipe 1	Equipe 2	t	R\$	R\$	R\$
Jan	1-117-104-8- 106-125-126- 143	2-16-76-96- 116-161-190- 136-31	61.881	640.211,14	7.341,70	297.962,48
Fev	89-142-5-103- 55	62-15-27-46	57.459	566.917,82	6.492,34	309.733,93
Mar	21-191-180- 140-151-29	110-49-189- 132-139-12- 200-168-25- 13-187-65	68.561	671.715,34	10.861,11	366.660,74
Abr	120-35-146- 38-7-80-164- 87	81-48-37- 149-77-19	59.116	586.438,86	8.973,06	284.813,66
Mai	20-71-47-99- 147-138-36	172-68-129- 3-158-57	62.353	612.743,85	7.763,29	291.686,22
Jun	193-113-155- 53-150-124- 84-182-197- 115-52	17-171-59- 101-75-194- 131-109	65.427	653.114,27	10.648,16	288.305,69
Jul	196-154-144- 39-34-51-173- 4-166	192-86-122- 167-42-133	51.883	511.479,65	10.279,56	222.408,97
Ago	92-137-198- 63-184-188- 162-178-128- 119-22-174	141-157-30- 45-121-90-69	64.436	627.824,27	9.278,25	318.657,12
Set	14-107-50- 179-114-85- 112-66-	82-160-148- 6-70-105- 195-94-98	61.836	617.664,64	9.882,06	282.917,33
Out	156-123-165- 102-88-177- 32-159	41-78-54-44- 11-61-152-10	59.295	590.219,03	6.719,96	222.806,81
Nov	127-83-135- 64-58-186- 145-111-18	91-60-175- 74-176-40-9	60.610	590.148,17	11.065,82	273.978,97
Dez	1-117-104-8- 106-125-126- 143	153-73-23- 93-72	58.100	572.105,25	10.456,15	284.641,06
Total	95	87	730.957	7.240.582,29	109.761,48	3.444.572,97

cc= custo de colheita, cd= custo de deslocamento, ct= Custo de transporte.

Nesse cenário, a distância média de transporte foi de 30,1 km, com média mensal variando de 25,7 a 35,8. A restrição de distância média de transporte foi

atendida em todos os meses, ou seja, não variou mais de 20% em relação à média anual (Tabela 6).

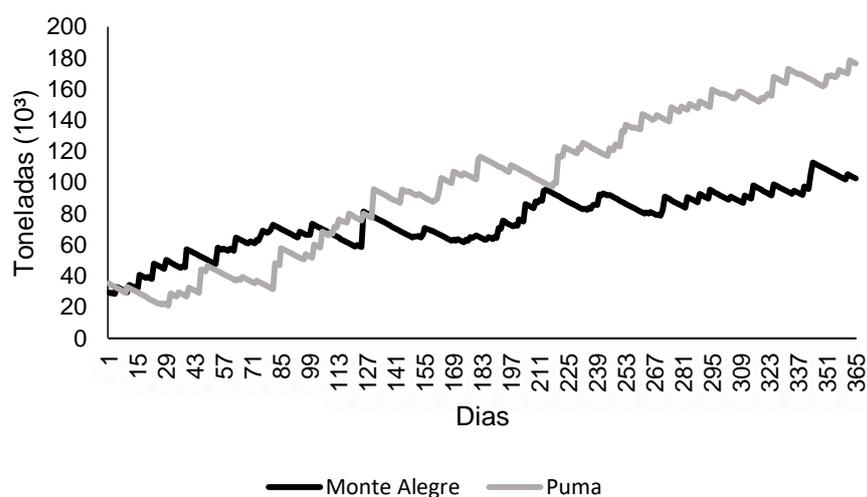
Tabela 6 – Distância média de transporte e distância média de deslocamento no cenário 1

Mês	Distância média de transporte	Distância média de deslocamento
	Km	Km
1	32,9	21,6
2	32,4	47,8
3	31,8	32,1
4	28,1	49,1
5	25,8	34,4
6	25,7	31,2
7	32,4	53,2
8	27,2	31,0
9	35,8	35,7
10	27,2	54,6
11	30,8	52,0
12	32,7	51,6
Total	30,1	40,2

Em relação ao controle de estoque, o estoque de madeira nos pátio foi suficiente para atender a demanda diária das fábricas e, ao mesmo tempo, não ultrapassou o limite máximo de capacidade do pátio. Em ambos os pátios, o estoque manteve um padrão crescente ao longo dos dias, sendo esse aumento mais acentuado na fábrica Puma.

O comportamento dos estoque de madeira no pátio das fábricas Monte Alegre e Puma pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Comportamento do estoque de madeira no pátio ao longo do horizonte de planejamento para o cenário 1.



## Cenário 2

O cenário 2 visa minimizar o custo total de colheita, sob restrições de variação de estoque. Nesse cenário, é desconsiderada a restrição de distância média de transporte. O objetivo foi verificar o efeito da ausência dessa restrição na distância de transporte e como isso reflete nos custos.

A otimização do cenário 2 resultou em um custo total da colheita de R\$ 10.560.687,23, correspondendo a colheita de 183 talhões e disponibilização de 722.694 toneladas de madeira,

Na Tabela 7 são apresentados a sequência de corte dos talhões, o volume colhido e os custos de colheita, deslocamento e transporte.

Tabela 7 – Sequência de corte dos talhões, quantidade de madeira colhida custos de colheita, deslocamento e transporte resultados da otimização do cenário 2

Mês	Sequência de corte		Quantidade de madeira	cc	cd	ct
	Equipe 1	Equipe 2	t	R\$	R\$	R\$
Jan	1-196-62- 191-103- 197-38-180- 95	2-52-160-140- 145-54-102	62,964	663.493,78	9.136,45	247.503,95
Fev	15-35-154- 99-98-166	116-60-5-36-125- 156-46-17-110- 194-42	38,499	405.586,28	6.660,33	130.313,17
Mar	134-144-40- 148-89-163- 183	182-85-135-11- 193-27-128-124	68,292	669.416,99	10.168,96	297.258,48
Abr	143-157- 142-61-78- 25-121	104-16-70-158- 123-84	55,304	542.978,20	10.332,39	319.122,22
Mai	28-37-113- 109-153- 175-138-69	8-164-112-39-86- 200-165-30	65,097	642.832,06	9.456,07	330.733,20
Jun	20-100-130- 23-93-172	48-88-66-19-137- 71	53,903	543.009,82	7.738,88	258.392,75
Jul	53-10-43- 29-127-72- 185-55	94-12-51-96-22- 189-167-59-82- 168-81-101	76,522	747.150,78	13.225,19	355.789,67
Ago	162-47-131- 129-184	161-106-117- 199-181-58-159- 118-63-50-45- 133	49,985	491.917,57	5.949,69	134.430,13
Set	188-92-91- 122-173-64- 105	126-87-186-108- 170-9	63,874	627.490,71	7.948,25	295.727,24
Out	174-75-14- 141-147-4	83-90-178-139- 198-107-187-176	56,289	557.750,43	9.049,00	281.216,48
Nov	67-44-49- 177-115- 155-41	74-111-190-120- 149-56-6-32	66,843	647.555,66	8.434,12	300.159,02
Dez	33-34-31- 169-79-152- 97	192-114-7-119- 171-146-21-77	65,122	629.651,71	118.14,84	331.292,76
Total	83	100	722,694	7.168.834,00	109.914,17	3.281.939,07

cc= custo de colheita, cd= custo de deslocamento, ct= Custo de transporte

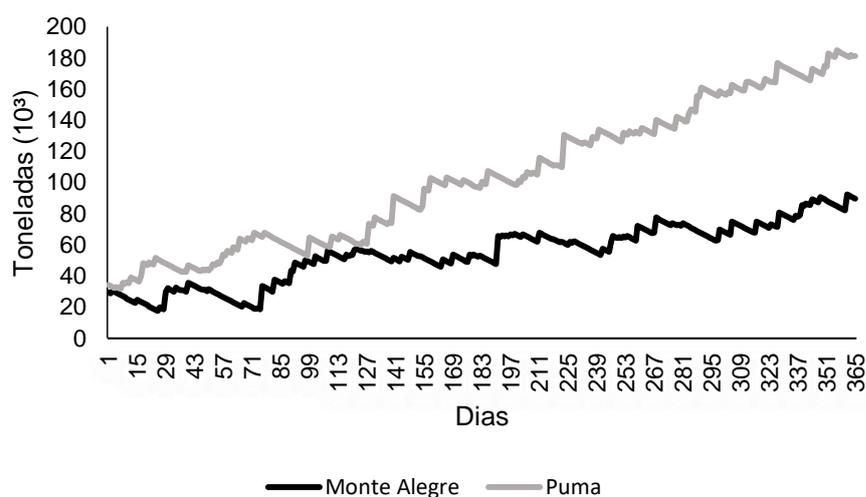
A distância média de transporte para o horizonte de planejamento de um ano foi de 29,7 km. Nota-se que houve uma grande variação da distância média de transporte entre os meses. No mês de março, a distância média de transporte foi 29,5, com um desvio de 1% da média anual. Já no mês de agosto, a distância média de transporte apresentada é igual a 16,9 km, variando 43% da média anual (Tabela 8).

Tabela 8 – Distância média de transporte e distância média de deslocamento no cenário 2

Mês	Distância média de transporte	Distância média de deslocamento
	Km	Km
1	27,8	38,4
2	19,8	26,4
3	29,5	45,7
4	40,2	53,7
5	31,5	40,0
6	31,3	43,8
7	30,8	45,0
8	16,9	23,9
9	35,2	41,8
10	34,7	44,2
11	27,3	38,6
12	36,9	54,1
Total	29,7	40,8

O estoque de madeira nos pátios das da Fábrica de Monte Alegre e Puma, se mantiveram dentro dos limites mínimos e máximos desejados, ou seja, o estoque foi suficiente para atender a demanda de matéria-prima e não ultrapassou a capacidade do pátio. O estoque de madeira no pátio apresentou comportamento semelhante ao cenário 1 (Figura 8).

Figura 8 – Comportamento do estoque de madeira no pátio ao longo do horizonte de planejamento para o cenário 2.



### Cenário 3

O cenário 3 teve como função objetivo minimizar os custos de deslocamento das frentes de colheita. Como para o problema em questão o custo de deslocamento é dependente da distância, minimizar esse custo equivale a minimizar a distância. Nesse cenário, também foram impostas restrições de controle de estoque e variação da distância média de transporte.

O custo total da colheita para esse cenário foi de R\$ 11.007.938,37, correspondendo a colheita de 182 talhões e disponibilização de 745.883 toneladas de madeira.

Na Tabela 9 são apresentados a sequência de corte dos talhões, o volume colhido e os custos de colheita, deslocamento e transporte.

Tabela 9 – Sequência de corte dos talhões, quantidade de madeira colhida, custos de colheita, deslocamento e transporte resultados da otimização do cenário 3

Mês	Sequência de corte		Quantidade de madeira	cc	cd	Ct
	Equipe 1	Equipe 2	t	R\$	R\$	R\$
Jan	1-15-56-85- 180-26-175-	2-89-10-68-	71.277	716.204,24	6.094,46	399.113,82
Fev	124-53-94- 118-71-106- 154-188-	40-125-184- 72-121-166-	49.008	496.100,32	9.653,19	207.999,96
Mar	156-174-61- 12-107-196- 32-24-	172-173-48- 64-44-119- 43-105-	69.327	688.004,20	8.320,63	340.878,20
Abr	181-90-8- 160-20-13- 78-167-165- 135-	91-152-179- 99-115-52- 126-97-138- 23-	54.525	552.790,26	10.323,40	223.181,02
Mai	35-153-199- 191-93-136- 123-109-	55-192-30-4- 100-	76.463	744.973,20	7.139,72	392.677,31
Jun	145-84-102- 33-168-178- 50-36-6-31-	176-142-51- 130-151-	53.912	524.213,79	8.450,71	266.923,79
Jul	63-103-81- 161-25-162- 149-171-95-	194-41-164- 159-141-19- 147-	67.390	682.885,83	10.329,61	276.028,50
Ago	113-195-62- 47-114-	198-155-79- 120-59-60- 190-101-73- 127-	56.003	549.738,26	8.589,84	228.504,19
Set	42-66-3-21- 132-108-	158-70-86- 129-185-34- 131-197-	57.638	576.415,01	8.564,79	229.709,46
Out	134-144-69- 146-133-111- 37-7-38-	139-177-11- 169-98-170- 163-110-	58.627	578.205,02	8.787,48	228.624,39
Nov	67-57-140- 112-186-49- 189-182-5- 77-	157-82-58- 183-104-200- 96-83-28-9-	54.158	530.110,81	12.261,29	284.951,93
Dez	65-45-18-88- 54-	14-87-75-22- 80-27-	77.555	751.958,97	4.581,85	434.648,93
Total	95	87	745.883	7.391.599,91	103.096,97	3.513.241,50

cc= custo de colheita, cd= custo de deslocamento, ct= Custo de transporte

A distância média de transporte dos talhões até as fábricas Puma e Monte Alegre foi de 30,3 km. Observa-se que em todos os meses a restrição de variação da distância média de transporte foi atendida, sendo o maior desvio igual a 18,4% apresentado no mês de agosto (Tabela 10).

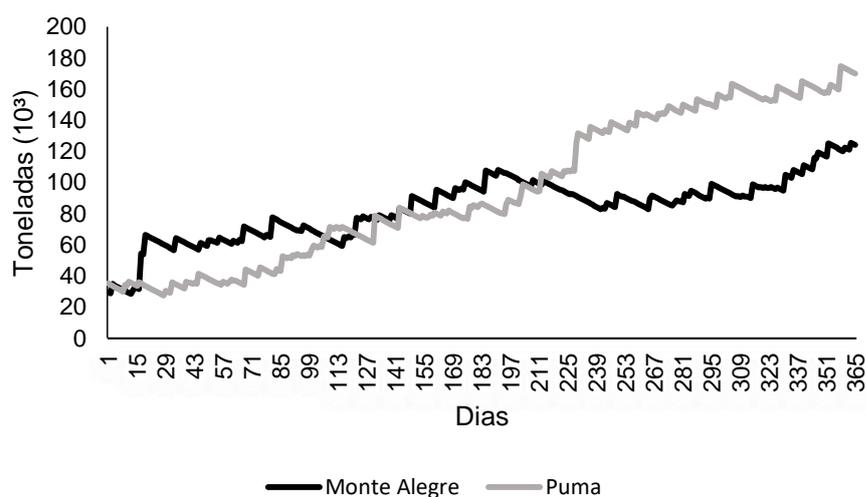
Tabela 10 – Distância média de transporte e distância média de deslocamento no cenário 3

Mês	Distância média de deslocamento	Distância média de transporte
	Km	Km
1	31,6	44,4
2	29,5	40,6
3	29,4	42,1
4	30,7	38,5
5	26,1	26,1
6	30,8	32,3
7	34,6	56,3
8	24,7	27,1
9	26,7	42,2
10	29,4	29,0
11	34,8	43,2
12	29,9	26,1
Total	30,3	38,0

A solução encontrada atendeu a restrição de controle de estoque, no qual o estoque de madeira ficou dentro dos limites mínimos e máximos desejados.

O comportamento dos estoque de madeira no pátio das fábricas Monte Alegre e Puma pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Comportamento do estoque de madeira no pátio ao longo do horizonte de planejamento para o cenário 3.



### Comparação dos cenários

Nos três cenários propostos, o custo de colheita (cc) é o que apresentou maior contribuição no valor do *fitness*, cerca de 68%. Já o custo menos expressivo foi o de deslocamento, contribuindo com o equivalente a 1%.

A contribuição de cada atividade no custo total da colheita varia com cada estudo de caso, visto que depende de um conjunto de fatores como tipo de maquinário, espacialização dos talhões, distância dos povoamento até o centro consumidor, entre outros.

O menor custo total de colheita foi apresentado pelo cenário 2. Ao desconsiderar a restrição de distância média de transporte do problema original, cenário 1, há uma redução deste custo de 2,17%. Apesar de em termos percentuais esse valor ser pequeno, em termos absolutos representa uma redução do valor da ordem de milhares (R\$ 234.229,51), visto o elevado custo dessa atividade.

Na Tabela 11 é apresentado o valor de *fitness* para cada cenário, bem como o custo de colheita por tonelada colhida.

Tabela 11 – Valor de *fitness* apresentado para cada cenário, bem como o custo de colheita por tonelada colhida

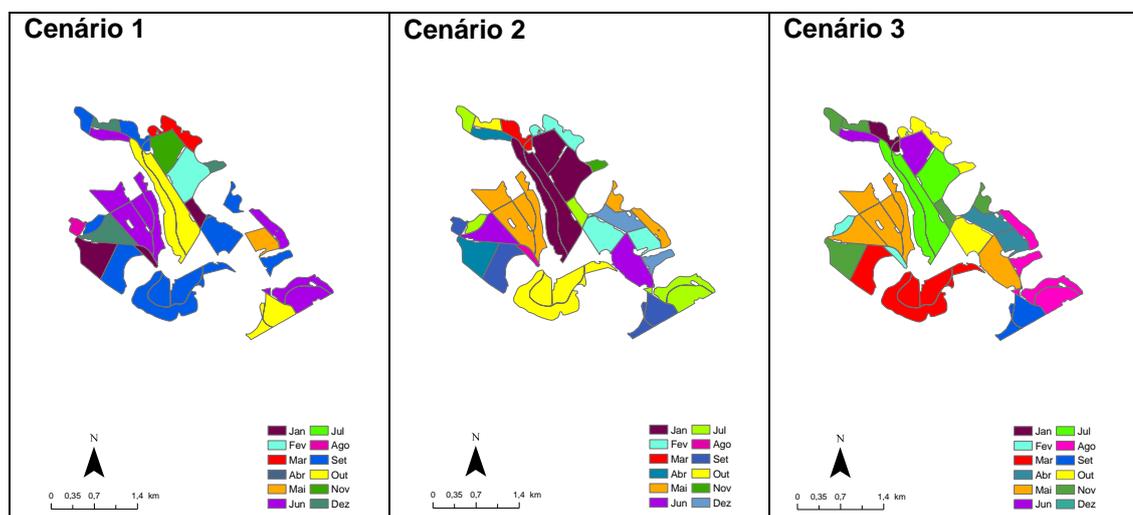
Cenário	Custo total de colheita	
	R\$	R\$/t
1	10.794.916,74	14,77
2	10.560.687,23	14,45
3	11.007.938,37	15,06

Ao analisar separadamente os custos de colheita, deslocamento e transporte, percebe-se que a maior redução ocorreu no custo de transporte (5%). Na ausência da restrição de distância média de transporte, o algoritmo teve maior liberdade para escolher a sequência ótima de corte, refletindo em um melhor *fitness*. Segundo Souza (2004), a partir do momento que se tem dois ou mais centros consumidores, a sequência de intervenção nos pontos de produção ao longo do ano pode influenciar significativamente no custo do transporte principal de madeira.

O cenário 3, apesar de ter apresentado o menor custo de deslocamento, apresentou o maior custo total de colheita. Esse resultado indica que, apesar de operacionalmente ser mais viável a colheita de talhões próximos, ao analisar custos, o ótimo global não indica essa proximidade.

Na Figura 10 é apresentada a alocação dos talhões na sequência de corte nos meses.

Figura 10 – Alocação dos talhões na sequência de corte nos meses.



Silva (2015), ao formular modelos de colheita florestal por blocos e talhões, objetivando minimizar a soma dos custos das atividades de colheita e dos custos relacionados à manutenção da rede de estradas florestais envolvida, verificou que o agendamento da sequência de corte a nível de talhão proporcionou menores custos. Segundo esse autor, o modelo a nível de talhão agenda individualmente os talhões para a colheita, tornando-o mais seletivo que o modelo a nível de bloco.

A distância média de transporte nos cenários 1, 2 e 3 apresentou coeficientes de variação iguais a 13%, 23% e 10%, respectivamente. A variação da distância de transporte afeta diretamente a demanda por mão-de-obra. Uma grande oscilação dessa é indesejável uma vez que implica na contratação de mão-de-obra em alguns meses, e a demissão em outros.

Por exemplo, no cenário 2, no qual não há restrição da distância média de transporte, essa variou de 16,9 a 40,2 km. Considerando uma velocidade de transporte de 80,0 km/hora, em 24 horas, percorre-se 57.600 km. Nesse caso, quando a distância média é 16,9, em um mês tem o potencial de realizar o transporte de madeira 1.704,14 vezes. Por outro lado, esse número cai para 716,42 quando a distância aumenta para 40,2. Desse modo, para cada caminhão que realiza o transporte numa distância de 16,9, seriam necessários 2,4 caminhões para realizar o transporte numa distância de 40,2 km.

O estoque de madeira apresentou uma tendência crescente nos três cenários. Desse modo, deve-se avaliar a possibilidade de diminuir a quantidade de equipes de colheita, de modo que continuem a atender a demanda das fábricas, mas sem comprometer a capacidade dos pátios de estocagem.

Nos três cenários propostos, o AG encontrou bons resultados. No entanto, considerando que a parametrização do algoritmo foi realizada com base na experiência de outros trabalhos, é possível que tais escolhas não tenham sido as mais adequadas para uma boa performance do AG. Desse modo, recomenda-se em trabalhos futuros ajustar os parâmetros com base em uma experimentação prévia. Além disso, seria interessante testar outros métodos heurísticos como por exemplo *simulated annealing*, busca tabu, entre outros.

Visando a formação de blocos para a colheita, recomenda-se acrescentar ao modelo restrições espaciais, de modo a formar uma área mínima de talhões

contínuos para o corte, ou mesmo inserir restrições de distância entre os povoamento a serem colhidos.

Análises mais detalhadas dos custos das atividades, envolvendo por exemplo custo de construção e manutenção de estradas, também podem ser acrescentadas em trabalhos futuros.

## 5 CONCLUSÕES

A modelagem proposta, utilizando como base o modelo de roteamento de veículos para o planejamento da colheita florestal, foi capaz de determinar a melhor sequência de corte para reduzir o custo total dessa atividade.

A restrição de controle de estoque se mostrou eficaz nos três cenários avaliados, nos quais os níveis de estoques ficaram dentro dos limites desejáveis.

Quando acrescida a restrição de distância média de transporte ao modelo, a coeficiente de variação da distância média reduz de 23% para 13%, no entanto há um aumento no custo total de 2,17%.

Os três cenários apresentaram boas soluções para o objetivo proposto. Desse modo, a escolha do modelo deve se basear no objetivo do gestor.

## REFERÊNCIAS

- ALI, O.; VERLINDEN, B.; OUDHEUSDEN, D. V. Infield logistics planning for crop harvesting operations. **Engineering Optimization**, v. 41, n. 2, p. 183-197, 2009. doi: 10.1080/03052150802406540
- ARCE, J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando à minimização de custos**. 1997. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- BAKER, B. M.; AYECHIEW, M. A. A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 30, n. 5, p. 787–800, 2003.
- BANHARA, J. R. et al. Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e climáticas. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 85, p. 85-95, 2010. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr85/cap08.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2016.
- BASHIR, L. Z.; SALIH, R.; HASAN, M. Solving Banana (Rosenbrock) Function Based on Fitness Function. **World Scientific News** v. 12, p. 41–56, 2015. Disponível em
- BASNET, C. B.; FOULDS, L. R.; WILSON, J. M. Scheduling contractors ' farm-to-farm crop harvesting operations. **International Transactions in Operational Research**, v. 13, n. 1, p. 1-15, 2006. doi: 10.1111/j.1475-3995.2006.00530.x
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de administração, contabilidade e economia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 355p.
- BERGER, R. et al. Minimização de custos de transporte florestal com a utilização da programação linear. **Floresta**, Curitiba, v. 33, n. 1, p. 53-62, 2003. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/floresta/article/download/2277/1902>>. Acesso em: 24 ago. 2016.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, L. P.; GREBNER, R. L. **Forest Management and Planning**. Elsevier, 2009. 331p.
- BEZERRA, F. **Planejamento Estratégico, Tático e Operacional**. 26 jul. 2014. Disponível em: < <http://www.portal-administracao.com/2014/07/planejamento-estrategico-tatico-operacional.html> >. Acesso em: 08 set. 2016.
- BINOTI, D. H. B. **Estratégias de regulação de florestas equiâneas com vistas ao manejo da paisagem**. 2010. 145 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- BOCHTIS, D. D.; SØRENSEN, C. G. The vehicle routing problem in field logistics part I. **Biosystems Engineering**, v. 104, p. 447-457, 2009. doi:

10.1016/j.biosystemseng.2009.09.003

BOCHTIS, D. D.; SØRENSEN, C. G. The vehicle routing problem in field logistics : Part II. **Biosystems Engineering**, v. 105, p. 180-188, 2010. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.10.006

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

CARIC, T.; GOLD, H. **Vehicle Routing Problem**. Croácia :In-the, 2008. 152 p.

CASTRO, R. R. **Regulação de florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 74 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

CEZANA, D. P. **Aplicação do modelo de roteamento de veículos no planejamento da colheita florestal**. 2013. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2013.

DONG, L. et al. A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: A case study of the simulated annealing algorithm. **Forest Ecology and Management**, v. 356, p. 124-135, nov. 2015. doi: 10.1016/j.foreco.2015.07.026

DYKSTRA, D.P. **Mathematical programming for natural resource management**. New York: McGraw-Hill, 1984. 318 p.

EKSIOGLU, B.; VURAL, A. V.; REISMAN, A. The vehicle routing problem: A taxonomic review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 57, n. 4, p. 1472-1483, 2009. doi: 10.1016/j.cie.2009.05.009

GALATSIDAS, S. et al. Forest production management and harvesting scheduling using dynamic Linear Programming (LP) models. **Procedia Technology**, v. 8, n. Haicta, p. 349-354, 2013. doi: 10.1016/j.protcy.2013.11.046

GOLDBARG, M.C.; LUNA, H.P.C. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005, 518p.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Addison-Wesley. 1989.

GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial**. 2009. 180 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HADDAD, H. M. D. **Roteamento otimizado no inventário florestal das árvores de belo horizonte**. 2015. 63 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

HEINEN, M.; OSÓRIO, F. Algoritmos genéticos aplicados ao problema de roteamento de veículos. *Hifen*, v. 30, no58, n. i, 2006.

HILLER, F. S., LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. Ed. McGraw-Hill, 2006. 828p.

LAPORTE, G. et al. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 7, n. 4-5, p. 285–300, 2000. doi: 10.1016/S0969-6016(00)00003-4

LARSEN, A. The Dynamic Vehicle Routing Problem. 2000. 192 p. Thesis (Doctor of philosophy) – Technical University of Denmark, Lyngby, Dinamarca, 2000.

LEGUES, A. D. et al. A tabu search approach for solving a difficult forest harvesting machine location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 179, p. 788–805, 2007. doi: 10.1016/j.ejor.2005.03.071

LEUSCHNER, W.A. **Introduction to forest resources management**. New York: John Wiley & Sons, 1984. 298 p.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos. Uma importante ferramenta da inteligência computacional**. 2. Ed.. Brasport. 2008. 400p.

MACHADO, C. C. et al. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2014. p. 16-45.

MACHADO, C. C. **Transporte rodoviário florestal**. 2. Ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 217 p.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2014. p. 206-252.

MALINOVSKI, J. R. Colheita de madeira, transporte florestal e integração com a cadeia produtiva. **Revista Opiniões 2008**, Ribeirão Preto, Set-Nov. 2008.

MALINOVSKI, J. R.; MALINOVSKI, R. A. **Evolução dos sistemas de colheita de Pinus na Região Sul do Brasil**. Curitiba: FUPEF, 1998. 138 p.

MALINOVSKI, J.R. et al. Sistemas. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2014. p. 178-205.

MALINOVSKI, R. A. et al. Otimização da distância de extração de madeira com *forwarder*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, p. 171-179, 2008. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr79/cap01.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2016.

MALINOVSKI, R. A. **Modelo matemático para otimização dos custos operacionais de transporte de toras com base na qualidade de estradas**.

2010. 180 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MENEGUZZI, C. C. **Modelo de roteamento de veículos aplicado ao planejamento do inventário florestal**. 2011. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

MCCARL, B. A; SPREEN, T. H. APPLIED MATHEMATICAL PROGRAMMING by Bruce A . McCarl Professor of Agricultural Economics Texas A & M University Thomas H . Spreen Professor of Food and Resource Economics University of Florida. **Draft Book Department of Agricultural Economics Texas AM University College Station TX**, p. 567, 2011.

MIRANDA, G. M. **Regulação de florestas equiâneas e implantação e regulação de povoamentos mistos**. 2003. 83 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. London, A Bradford Book, 1996. 205p.

MITCHELL, S. A. **Operational Forest Harvest Scheduling Optimization: A mathematical model and solution strategy**. 2004. 252 f. Tese (Doctor of Philosophy) – University of Auckland, Auckland, New Zealand, 2004.

NASCIMENTO, F. A. F. **Planejamento florestal com restrições de adjacência utilizando programação paralela**. 2014. 130 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Curitiba, PR, 2014.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O. Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters. **Silva Fennica**, v. 44, n. 1, 2010.

PARISE, D. J. **Influência dos requisitos pessoais especiais no desempenho de operadores de máquinas de colheita florestal de alta performance**. 2005. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

PAULA JUNIOR, G.G. **Introdução à pesquisa operacional**. Campus, RJ: UENF/CCT, Laboratório de Ciências de Engenharia/Setor de Engenharia da Produção. 1998, 355p. (Notas de aula).

PIASSI, L. C. **Métodos de regulação florestal no planejamento da produção de madeira**. 2011. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

PILLAC, V. et al. A review of dynamic vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 225, n. 1, p. 1–11, 2013.

PULKKI, R.E. Glossary of forest harvesting terminology. Disponível em: <flash.lakeheadu.ca/~repulkki/REP\_terminology.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2016.

RIBEIRO, C.A.A.S. **Otimização florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2007. (Nota de aula).

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 2001. 225 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2001.

RODRIGUES, F. L. **Regulação de florestas equiâneas utilizando programação linear**. 1997. 109 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

SCHETTINO, S.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P. Correlação entre volumetria de florestas de eucalipto e produtividade e custos de máquinas de colheita de madeira. **Revista Arvore**, v. 39, n. 5, p. 935-942, 2015.

SEIXAS, F.; WIDMER, J. A. Seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal de madeira utilizando-se programação linear não-inteira. **IPEF**, n. 46, p. 107-118, 1993.

SILVA, G. F. **Problemas no uso de programação matemática e simulação em regulação florestal**. 2001. 89 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

SILVA, P. H. B. M. **Planejamento otimizado da colheita florestal por blocos e talhões integrado à rede de estradas**. 2015. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SIVANANDAM, S. N.; DEEP, S. N. **Introduction to genetic algorithms**. Springer, 2008.

SMALTSCHINSKI, T.; SEELING, U.; BECKER, G. Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimised harvest scheduling. **Annals of Forest Science**, v. 69, n. 5, p. 651-657, 2012. doi: 10.1007/s13595-012-0182-7

SOSA, N. G. M.; GALVÃO, R. D.; GANDELMAN, D. A. Algoritmo de busca dispersa aplicado ao problema clássico de roteamento de veículos. **Pesquisa Operacional**, v. 27, n. 2, p. 293-310, 2007. doi: 10.1590/S0101-74382007000200006

SOUZA D. O. **Algoritmos genéticos aplicados ao planejamento do transporte principal de madeira**. 2004. 169 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2004.

STANG, M. B. **Planejamento florestal espacial para o agendamento otimizado das atividades de colheita**. 2016. 56 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

TOTH, P.; VIGO, D. Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. **Discrete Applied Mathematics**, v. 123, n. 1–3, p. 487-512, 2002.

WANG, X. et al. The min-max split delivery multi-depot vehicle routing problem with minimum service time requirement. **Computers and Operations Research**, v. 71, p. 110-126, 2016.

YU, X., GEN, M. **Introduction to Evolutionary Algorithms**. Springer, 2010.433 p.

## APÊNDICE

Para um melhor detalhamento da aplicação do Algoritmo Genético no problema abordado nesse trabalho, foi idealizado um pequeno exemplo envolvendo a colheita de 4 talhões. No problema exemplo, a colheita é realizada por 1 equipe, para atender a demanda de uma fábrica, por 5 dias.

A descrição da quantidade de madeira de cada talhão, bem como a matriz de distâncias estão apresentadas nas Tabelas 12 e 13, respectivamente.

Tabela 12 – Quantidade de madeira da floresta

Quantidade de madeira (t)	Talhão			
	1	2	3	4
	2.850	1.100	2.000	1.000

Tabela 13 – Matriz de distâncias (km)

	Talhão			
	1	2	3	4
1	0			
2	14	0		
3	32	15	0	
4	20	28	35	0
Fábrica	27	19	31	22

A estrutura geral do algoritmo é apresentado na Figura 1. O AG inicia com a formação da população inicial.

### População inicial

A população inicial é gerada aleatoriamente, sendo composta por um conjunto de indivíduos que representam possíveis soluções. A seguir, um exemplo de duas possíveis soluções para o problema.

#### *Indivíduo 1*

	Dias				
	1	2	3	4	5
Talhão	1	1	4	3	3
Equipe	1	1	1	1	1
Fábrica	1	1	1	1	1

*Indivíduo 2*

	Dias				
	1	2	3	4	5
Talhão	1	1	3	3	2
Equipe	1	1	1	1	1
Fábrica	1	1	1	1	1

A geração da população inicial atendeu as seguintes premissas: cada talhão deve ser colhido uma única vez, por um única equipe e a madeira enviada apenas para uma fábrica (restrição de singularidade (16)); a colheita deve iniciar no talhão 1 (restrição de partida (17)); o planejamento de corte dos talhões não deve ultrapassar a capacidade da colheita são de 5 dias (restrição capacidade da colheita (18)).

Na descrição a seguir é detalhada a geração das possíveis soluções. O talhão 1 possui 2850 t, sendo necessários 1,98 dias para a equipe colher toda madeira. No terceiro dia, a equipe 1 está disponível para se deslocar para o próximo talhão, no caso do indivíduo 1, para o talhão 4. A distância entre o talhão 1 e o 4 são 20 km. A equipe 1 se desloca a um velocidade de 2,5 km/hora, gastando 0,3 dia para realizar o deslocamento entre os talhões. O talhão 4 possui 1000t, sendo necessários 0,69 dias para colher o talhão. No quarto dia, a equipe então se desloca para o talhão 3. A distância entre o talhão 4 e o 3 são 35 km, gastando 0,6 dia para realizar o deslocamento entre os talhões. O talhão 3 possui 2000 t, sendo necessários 1,39 dias para a equipe 1 colher toda madeira. Dessa forma, durante o horizonte de 5 dias, a sequência de corte apresentada pelo indivíduo 1 foi 1 → 4 → 3.

**Avaliação da população**

Uma vez gerada a população inicial, é calculado o *fitness* de cada indivíduo de acordo com a equação 25, que é apresentada novamente a seguir:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C_{i,j,k,p,t} X_{i,j,k,p,t} + \alpha \left( \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sigma_{p,t} \right) + \beta \left( \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \omega_{j,p,m} \right) \quad (25)$$

A função objetivo visa minimizar o custo de colheita e transporte, sob penalidades impostas de variação do estoque de madeira acima ou abaixo do desejado e à variação da distância média entre os meses maior que 20%. No problema exemplo, por se tratar de uma forma simplificada, assumiu-se que a

restrições de controle de estoque, (26) e de distância média de transporte (27) foram atendidas em todas as possíveis soluções.

Nesse sentido, os indivíduos foram avaliados de acordo com o custo total de colheita, que envolve o custo de colheita, o custo de deslocamento e o custo de transporte.

$$C_{i,j,k,p,t} = CC_{j,k,t} + CD_{i,j,t} + CT_{j,p,t}$$

#### Custo de colheita

Refere-se ao custo da equipe colher o talhão. Foi considerado um custo de colheita de R\$ 10/t independente da produtividade da floresta (Tabela 14).

Tabela 14 – Custo de colheita

Custo de colheita	Talhão			
	1	2	3	4
	R\$28.500,00	R\$11.000,00	R\$20.000,00	R\$10.000,00

#### Custo de deslocamento

Esse trata-se do custo da equipe de colheita se deslocar de um talhão para outro. Ao dividir a matriz de distâncias pela velocidade de deslocamento da equipe de colheita (2,5km/h) e multiplicar pelo custo de deslocamento (R\$ 37/h) encontramos a matriz de custos de deslocamento (Tabela 15)

Tabela 15 – Custo de deslocamento

	Talhão			
	1	2	3	4
1				
2	R\$ 207,20			
3	R\$ 473,60	R\$ 222,00		
4	R\$ 296,00	R\$ 414,40	R\$ 518,00	

#### Custo de transporte

O custo de transporte refere-se ao custo de levar a madeira colhida em cada talhão até a fábrica, sendo dado pela equação (14).

Considerando a distância de cada talhão a fábrica (Tabela 16), o custo de transporte é apresentado a seguir:

Tabela 16 – Custo de transporte

Custo de transporte	Talhão			
	1	2	3	4
	R\$3,93	R\$3,24	R\$4,27	R\$3,50

Na tabela 17 é apresentado o valor de *fitness* do indivíduo 1:

Tabela 17 – Valor de *fitness* do indivíduo 1 do problema exemplo

	Talhão		
	1	4	3
cc	R\$28.500,00	R\$10.000,00	R\$20.000,00
cd		R\$ 296,00	R\$ 518,00
ct	R\$3,93	R\$3,50	R\$4,27 0
<b>Fitnees</b>		<b>R\$ 59.321,43</b>	

#### Seleção, *crossover* e mutação

Na seleção são escolhidos os indivíduos (pais) na população para a reprodução, que dará origem a uma nova geração de indivíduos (filhos).

O método de seleção adotado foi da roleta russa. Este método consiste em associar a cada indivíduo uma fatia da roleta igual a sua probabilidade de sobrevivência ( $P_i$ ) dada por:

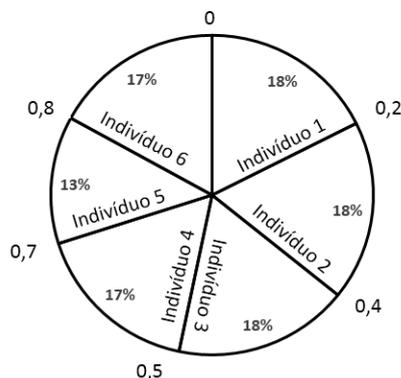
$$P'_i = \frac{1}{(E_i / \sum_{i=1}^n E_i)} \quad (28)$$

$$P_i = \frac{P'_i}{\sum_{i=1}^n P'_i} \quad (29)$$

Após calculada a probabilidade de sobrevivência de cada indivíduo, atribuiu-se a cada indivíduo uma fatia ( $F_i$ ) na roleta igual à sua probabilidade de sobrevivência  $P_i$ . Os indivíduos são assinalados sequencialmente na roleta, onde cada indivíduo  $i$  da população tem sua fatia ( $F_i$ ) na roleta compreendida no intervalo  $L_{i-1} < F_i < L_i$ . Por exemplo, o intervalo da roleta para o indivíduo 1 é ( $0 < F_1 < 0.2$ ), para o indivíduo 2 é

( $0.2 < F_2 < 0.4$ ) e assim, até o último indivíduo (6) com o intervalo dado por ( $0.8 < F_6 < 1$ ) (Figura 11).

Figura 11 – Representação da roleta russa.



Após definidos os intervalos que cada indivíduo ocupa na roleta, um número aleatório  $r$  ( $0 < r < 1$ ) é gerado para simular uma rodada da roleta. O indivíduo selecionado em cada rodada da roleta é aquele cujo número aleatório gerado pertence ao intervalo do respectivo indivíduo na roleta. Por exemplo, se um número aleatório  $r = 0,45$  fosse sorteado, o indivíduo 3 seria escolhido.

Na Tabela 17 é apresentado um conjunto de indivíduos com seus respectivos *fitness*, probabilidade de escolha, e intervalo da fatia ( $F_i$ ).

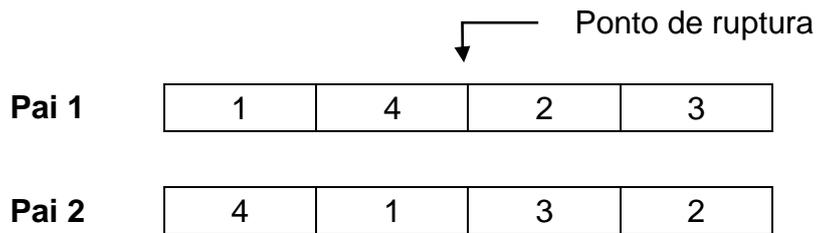
Tabela 18 – *Fitness*, probabilidade de escolha e intervalo na roleta de cada indivíduo do problema exemplo

Indivíduo	<i>Fitness</i>	$P'_i$	$P_i$	$F_i$
1	R\$59.321,43	6,42	0,18	0 - 0,2
2	R\$57.423,43	6,63	0,18	0,2 - 0,4
3	R\$59.522,43	6,39	0,18	0,4 - 0,5
4	R\$62.122,43	6,13	0,17	0,5 - 0,7
5	R\$80.872,43	4,71	0,13	0,7 - 0,8
6	R\$61.352,43	6,20	0,17	0,8 - 1
Soma	R\$380.614,58	36,48	1,00	

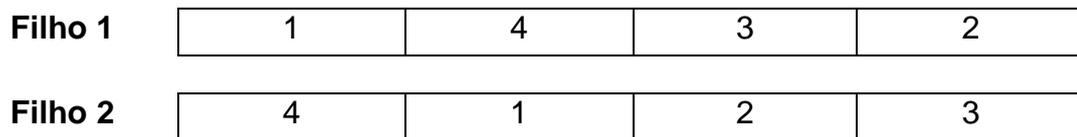
### Crossover

Este operador permite a obtenção de novos indivíduos (filhos), a partir da combinação (cruzamento) dos cromossomos dos pais.

Pais

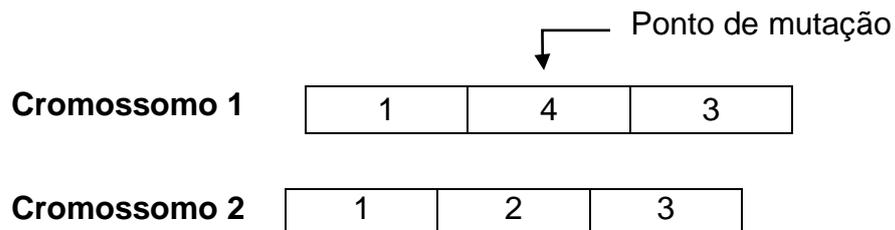


Filhos



Mutação

O operador de mutação altera o valor de alguns alelos do cromossomo, conferindo diversidade à população.



Critério de parada

O critério de parada determina um momento onde se considera a melhor solução da população como sendo uma solução aceitável para o problema. O critério de parada adotado foi: após o AG encontrar uma solução na  $i$ -ésima iteração e ela permanecer como a melhor solução por 300 iterações, considerou-se que o algoritmo convergiu.