

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LINAMARA SMANIOTTO FERRARI

PLANEJAMENTO TÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA
FLORESTAL

CURITIBA

2018

LINAMARA SMANIOTTO FERRARI

PLANEJAMENTO TÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA
FLORESTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce
Coorientador: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

CURITIBA

2018

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Ferrari, Linamara Smaniotto

Planejamento tático para otimização das atividades de colheita
florestal / Linamara Smaniotto Ferrari. – Curitiba, 2018.
69 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba,
26/02/2018.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Colheita florestal. 2. Manejo florestal – Programação linear. 3. Florestas
Planejamento. 4. Teses. I. Arce, Júlio Eduardo. II. Pelissari, Allan Libanio. III.
Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.31

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL
Código CAPES: 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LINAMARA SMANIOTTO FERRARI**, intitulada: " **PLANEJAMENTO TÁTICO PARA A OTIMIZAÇÃO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA FLORESTAL** ", após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho,

são de parecer pela sua

APROVAÇÃO

Curitiba, 26 de fevereiro de 2018.

Prof. JULIO EDUARDO ARCE (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)

Prof. AFONSO FIGUEIREDO FILHO (UFPR)

Prof. EDILSON BATISTA DE OLIVEIRA (EMBRAPA)



AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Julio Eduardo Arce, pela nobre orientação, paciência e apoio proporcionado ao longo do curso, ao inestimável conhecimento transferido e ao estímulo para continuar progredindo nessa área.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari, pela contínua atenção e disposição para me ajudar, e ao valioso compartilhamento de seus conhecimentos ao longo do curso.

Ao meu pai, Celito Ferrari, minha mãe Judite Ana Smaniotto Ferrari e minha irmã Laiana Smaniotto Ferrari, meus grandes alicerces de amor e educação, que sempre me apoiaram incondicionalmente nessa jornada.

À Jacques Yoshio Matsui, que me instigou a pesquisar sobre a área da programação linear e assim me entusiasmar a participar do processo seletivo de mestrado nessa maravilhosa área. Agradeço também ao contínuo apoio, força, amor e companheirismo que me proporciona.

À minha família Curitibana do “AP 31”, Amanda Koche Marcon e Myrcia Minatti. Meninas mais que especiais que Deus colocou no meu caminho. Família essa que me proporcionou muitos momentos de alegria, aprendizados e até de uma vida saudável, com exercícios e alimentação correta.

Aos amigos que conheci nessa jornada e que continuarão como amigos para sempre, que não somente fizeram desse período uma etapa de crescimento profissional, mas também de crescimento pessoal. Ao Deivison Venicio Souza, Joielan Xipaia dos Santos, Vinícius Morais Coutinho e Tamires Sfeir. Aos amigos do Laboratório de Manejo Florestal pelo cafezinho e conversas construtivas. E aos meus grandes amigos Maite dos Santos Ribeiro, Julio Peretti e Rubens Silva.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, pela honra de estudar na instituição de ensino florestal mais antiga do país.

À empresa que me possibilitou desenvolver este trabalho com dados de suas áreas utilizados neste estudo.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos.

Meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

Obrigada!

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo formular modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) como suporte à tomada de decisões de planejamento tático da colheita florestal, em povoamentos de *Pinus* spp., para o abastecimento de uma empresa de celulose catarinense. Foram formulados modelos de colheita por blocos e talhões, com diferentes funções objetivo, visando avaliar o comportamento de cada modelo quanto os custos presentes, distribuição espacial e riscos de implementação do plano. O cenário que minimizou a oscilação do volume por blocos apresentou a melhor solução, observando-se que a fragmentação causada pelo uso de talhões bem como o risco de produção descontínuo, ao longo do horizonte de planejamento, pode ter efeito negativo sobre a indústria. Assim, formulou-se também modelos que buscassem minimizar os custos por blocos, assumindo restrições de equilíbrio de volume e minimização das distâncias, considerando a iteração entre as unidades de manejo e a distribuição das áreas. Para tal, após a solução dos modelos aplicou-se o algoritmo da árvore geradora mínima (*Minimum spanning tree*) avaliando-se as distâncias totais de dispersão da colheita referentes aos cinco anos de planejamento, dada a grande importância econômica das estradas em um problema da colheita florestal. Avaliou-se que o cenário que minimizou os custos, forçou a equalização do volume e limitou a dispersão da colheita, demonstrou a melhor alternativa de remuneração e de menor risco de oportunidade advinda do povoamento florestal.

Palavras-chave: Programação linear inteira mista; Custo; Planejamento tático.

ABSTRACT

The objective of this work was to formulate Mixed Integer Linear Programming (PLIM) models to support the decision making of forest harvesting tactics in *Pinus* spp. Stands for the supply of a Santa Catarina pulp company. Collection models were formulated for stands and blocks with different objective functions, aiming at evaluating the behavior of each model in terms of the present costs, spatial distribution and risks of plan implementation. The scenario that minimized the volume oscillation by blocks presented the best solution, observing that the fragmentation caused by the use of blocks as well as the risk of discontinuous production, over the planning horizon, could have a negative effect on the industry. Thus, models were also formulated that sought to minimize costs by blocks, assuming volume balance restrictions and minimizing distances, considering the iteration between the management units and the distribution of the areas. To do so, after the solution of the models, the minimum spanning tree algorithm was applied, evaluating the total dispersion distances of the crop for the five years of planning, given the great economic importance of roads in a problem of forest harvest. It was evaluated that the scenario that minimized the costs, forced the equalization of the volume and limited the dispersion of the harvest, demonstrated the best alternative of remuneration and of less risk of opportunity coming from the forest stand.

Keywords: Mixed integer linear programming; Cost; Tactical planning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO PLANEJAMENTO FLORESTAL. ...	16
FIGURA 2 - MATRIZ DE PLANEJAMENTO SIMPLIFICADO DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO MANEJO FLORESTAL, COLHEITA E TRANSPORTE.....	18
FIGURA 3 - TEMPOS DE SOLUÇÃO NECESSÁRIOS EM RELAÇÃO AO PERÍODO DE PLANEJAMENTO DE ATIVIDADES FLORESTAIS.	20
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO INICIAL DAS CLASSES DE IDADE DO POVOAMENTOS DE <i>Pinus</i> spp.	31
FIGURA 5 - PRODUÇÃO ANUAL DE VOLUME DE MADEIRA PRODUZIDA AO LONGO DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.	37
FIGURA 6 - AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA DE <i>Pinus</i> spp. AO LONGO DE CINCO ANOS DE PLANEJAMENTO.	38
FIGURA 7 - ESTRUTURA INICIAL DA FLORESTA POR FAIXA ETÁRIA.....	52
FIGURA 8 - AGENDAMENTO TÁTICO DA COLHEITA FLORESTAL DOS CENÁRIOS K, L E M.....	57
FIGURA 9 - CUSTO PRESENTE DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA DE <i>Pinus</i> spp.	58
FIGURA 10 - SOMA PERIÓDICA DAS REDES DE ESTRADAS (Km) UTILIZADAS NOS DIFERENTES CENÁRIOS SIMULADOS.	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CENÁRIOS UTILIZADOS PARA O AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA DE <i>Pinus</i> spp.	34
TABELA 2 - RESULTADO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO PARA CADA CENÁRIO DE AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA DE <i>Pinus</i> spp.	41

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2.	OBJETIVO	13
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1.	PLANEJAMENTO FLORESTAL HIERÁRQUICO.....	15
3.2.	PESQUISA OPERACIONAL	19
3.2.1.	Programação linear e extensões	20
3.2.2.	Métodos heurísticos.....	22
	REFERÊNCIAS	24
4.	AGENDAMENTO TÁTICO DA COLHEITA FLORESTAL EM POVOAMENTO DE <i>Pinus</i> spp.....	27
	RESUMO	27
	ABSTRACT	28
4.1.	INTRODUÇÃO.....	29
4.2.	MATERIAL E MÉTODOS	31
4.2.1.	Área de estudo	31
4.2.2.	Obtenção da matriz de distância	31
4.2.3.	Classificação de declividade.....	32
4.2.4.	Parâmetros	32
4.2.5.	Modelo de otimização.....	33
4.3.	RESULTADO E DISCUSSÃO	37
4.4.	CONCLUSÕES.....	44
	REFERÊNCIAS	45
5.	PLANEJAMENTO TÁTICO DA COLHEITA FLORESTAL CONSIDERANDO DIFERENTES RESTRIÇÕES DE AGENDAMENTO	48
	RESUMO	48
	ABSTRACT	49
5.1.	INTRODUÇÃO.....	50
5.2.	MATERIAL E MÉTODOS	52
5.2.1.	Área de estudo	52
5.2.2.	Parâmetros gerais	53
5.2.3.	Geração dos fluxos de rotas.....	53

5.2.4.	Modelos matemáticos.....	54
5.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.4.	CONCLUSÕES.....	61
	REFERÊNCIAS	62
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
	REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é mundialmente reconhecido pela alta produtividade anual de suas florestas plantadas, em razão do volume de madeira produzida por unidade de área e por necessitar de um menor tempo de rotação para o corte final (IBÁ, 2017). Esse alto padrão de produção se deve às condições de clima e solo, tal como do contínuo melhoramento do manejo florestal no País. Todavia, nos últimos anos, a inflação do setor de árvores plantadas – medida pelo Índice Nacional de Custos da Atividade Florestal (INCAF-Pöyry) –, vem apresentando a tendência de aumentos superiores à inflação nacional, o que torna a produção de madeira mais onerosa e gera um desafio na manutenção da concorrência do setor florestal interno em relação ao mercado internacional (IBÁ, 2017).

Por conseguinte, as empresas do setor florestal apresentam-se diante de um desafio de aprimoramento de técnicas operacionais para se manterem competitivas no mercado. Contudo, para a obtenção de reduções consideráveis nos custos operacionais torna-se necessário intervir, inicialmente, em áreas de maior representatividade da cadeia de abastecimento, uma vez que caracterizam grande parte do custo total e que necessitam ser bem planejadas.

As operações de colheita, construção e manutenção de estradas são consideradas atividades de grande importância no setor, pois chegam a representar 50% dos custos totais da madeira posta na unidade consumidora (MACHADO, 2014). Assim, processos que apresentam reduções de custo nessas etapas, causam grande impacto econômico na atividade florestal (CEZANA, 2013).

Não obstante, além da preocupação com a produção de madeira e a capitalização de recursos financeiros, o mercado florestal vem reconhecendo a importância de reduzir os impactos ambientais da colheita em termos de erosão e estética da paisagem (MARQUES et. al, 2014). Dessa maneira, para se obter retorno satisfatório sobre o investimento e que se atinja os objetivos estabelecidos, torna-se necessário a aplicação de técnicas matemáticas que auxiliem na elaboração de planos operacionais realistas.

Os modelos de planejamento otimizado buscam determinar a melhor solução possível para um problema sujeito a uma ou mais restrições. No entanto, formular um modelo que descreva condições reais de maneira adequada e que seja resolvido dentro de um período prático representa um desafio complexo. O tempo razoável de

processamento de um modelo varia de acordo com o tipo de problema. Geralmente, o planejamento de ações operacionais requer tempo de processamento imediato (minutos). Em contrapartida, planos longos (centenas de anos) podem ser realizados no decorrer de horas. (D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011). Em planejamentos operacionais, tradicionalmente, são selecionadas heurísticas, meta-heurísticas e métodos de rede para a obtenção de soluções dos problemas, enquanto que a programação linear inteira mista e métodos de programação estocástica são melhores empregados em problemas de planejamento tático e estratégico (RÖNNQVIST, 2003; D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011).

Desse modo, o presente trabalho aborda um problema tático de abastecimento de matéria-prima que atenda a demanda industrial de uma empresa de celulose catarinense.

Em meio a este cenário, levanta-se o questionamento de que maneira é possível organizar as operações relacionadas a etapa de corte e eventuais necessidades de aquisição da matéria-prima florestal com o uso de formulações matemáticas? E, esses cenários podem gerar economia para a empresa, continuidade de abastecimento da indústria e distribuição espacial das áreas de corte?

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo formular, resolver e comparar modelos matemáticos de agendamento florestal, de nível tático, que atendam a demanda industrial de uma empresa de celulose catarinense.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar diferentes funções objetivo sujeitas a diferentes níveis de fragmentação espacial da colheita (talhão e bloco) com o escopo de analisar seus resultados e consequências em eventual implantação.

- Formular modelos de minimização de custo da colheita florestal por blocos, visando minimizar a soma dos custos das atividades de colheita sujeitas as restrições de equilíbrio e dispersão das unidades de manejo, incorporando restrições de geração de caminhos de escoamento da matéria-prima.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PLANEJAMENTO FLORESTAL HIERÁRQUICO

O planejamento é considerado como uma etapa em que são especificadas ações para alcançar objetivos e metas futuras (SCHNEIDER, 2009), possibilitando avaliar os impactos das decisões relacionadas aos períodos que forem implementados (BEAUDOIN; FRAYRET; LEBEL, 2008). Um plano de gerenciamento também explica o raciocínio do porquê a organização apresenta uma boa solução para o futuro (MCDILL, 2014). A não utilização de um plano pode orientar ações de curto prazo, que, em contrapartida, podem apresentar consequências indesejáveis ou insustentáveis no longo prazo (DEMERS et al., 2001; BETTINGER et al., 2009).

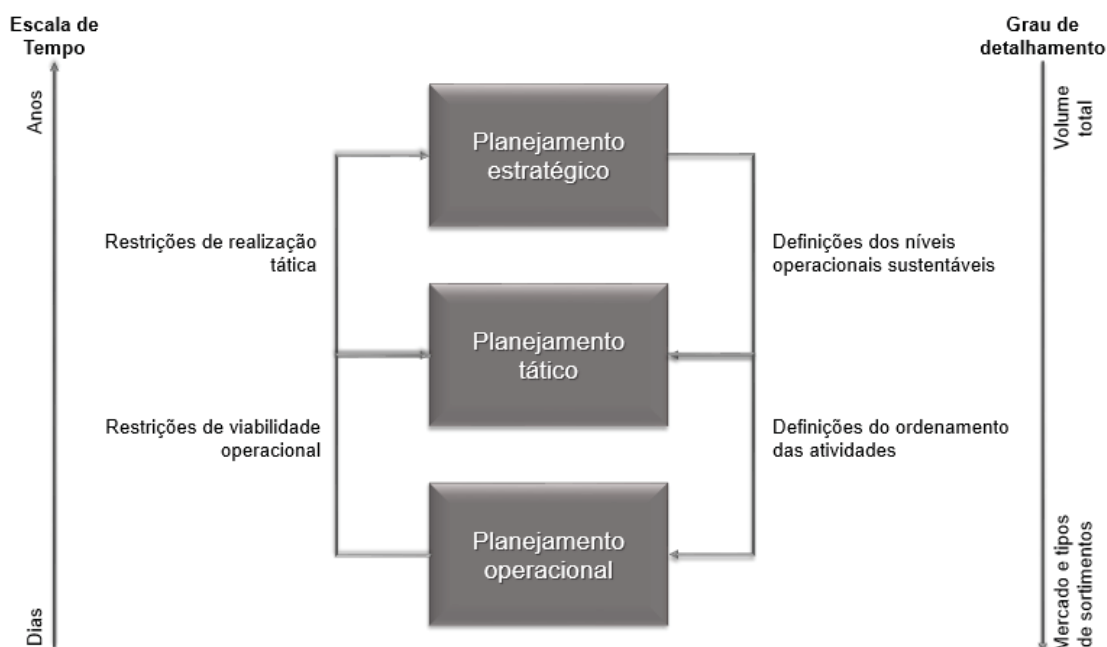
Ter um bom plano e demonstrar que o mesmo pode e será implementado proporciona credibilidade a uma organização. Todavia, não planejar, ou ter um planejamento, e não segui-lo, aumenta a possibilidade de ineficiência, maior risco e falta de confiabilidade (MCDILL, 2014). Além do mais, o propósito de planejar o futuro não compete apenas em decidir o que deve ser feito amanhã, e sim o que deve ser feito hoje para se obter os resultados pretendidos no futuro (DRUCKER, 2001).

Entretanto, planejar o uso do recurso florestal, especificamente, é um processo muito peculiar e desafiador, devido às características intrínsecas do recurso, dos processos transformadores e das estruturas e comportamentos do mercado. Ademais, os gestores se defrontam com objetivos conflitantes e muitas vezes inter-relacionados e a mudança de uma variável pode influenciar em todas as outras envolvidas.

Algumas variáveis são biológicas, como o potencial de crescimento combinado com o tipo de solo e espécie; algumas são econômicas, como o preço da madeira e o custo operacional; e outras são sociais, como as leis ambientais que podem regular o tratamento de uma floresta (BUONGIORNO; GILLES, 1987). Além de que, os longos períodos de tempo necessários para que as árvores amadureçam, o número substancialmente ilimitado de regimes de manejo possíveis, a extensão das áreas plantadas e a diversidade de fatores técnicos econômicos e ambientais, tornam essas decisões particularmente complexas (ARCE, 1997; ÖHMAN, 2001; MACHADO, 2014).

Para simplificar a complexidade do planejamento original, que possui diferentes objetivos e diferentes escalas, tradicionalmente, divide-se o mesmo em três classes hierárquicas de planejamento, sendo: estratégico, tático e operacional. O plano hierárquico organiza as informações para a tomada de decisões, em que as camadas mais altas definem os recursos disponíveis para as camadas abaixo (BOYLAND, 2003), enquanto os níveis mais baixos implementam os objetivos definidos e fornecem retorno sobre a viabilidade da ação para os níveis mais altos (FIGURA 1).

FIGURA 1 - ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO PLANEJAMENTO FLORESTAL.



FONTE: Adaptado de BOYLAND (2003) e MITCHELL (2004).

No nível mais alto da hierarquia estão os modelos de planejamento estratégico, que contemplam a definição de metas de longo prazo e de grande escala, que equivalem, geralmente, a um horizonte temporal de uma vez e meia à duas rotações de uma floresta (CLUTTER et al., 1983). O objetivo desses modelos consiste em elaborar uma trajetória de decisões que levem a níveis de produção a longo prazo, medidos em termos métricos (CHURCH, 2007), enfatizando relações ligadas ao uso da floresta, como áreas de colheita, alocações e tratamentos silviculturais, e suas diferentes consequências socioeconômicas, tais como, problemas ambientais,

rendimento não-contínuo, capacidade empregatícia, acesso florestal e competitividade industrial (D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011).

Todavia, essa etapa de planejamento apresenta o momento de executar as operações como um todo, sem levar em consideração quaisquer aspectos técnicos relacionados com a forma de como as operações deverão ser conduzidas (MARQUES et al., 2014). Além de que, aspectos espaciais normalmente são ignorados nessa fase, embora com os recentes avanços em tecnologia e *software* apresentarem menos razões para evitar essas questões no planejamento estratégico (BETTINGER et al., 2009).

Com a sustentabilidade dos recursos a longo prazo e a capacidade de produção estabelecida no nível estratégico, o planejamento tático pode se concentrar na maneira de como melhor estruturar as atividades (BOYLAND, 2003), pois o nível de detalhamento aumenta à medida que o planejamento estratégico avança para o planejamento operacional. Nesse estágio, o modelo tático não representa todas as questões que um modelo de nível operacional pode envolver, o que facilita a tradução de decisões para unidades espaciais menores em preparação para a aplicação de modelos operacionais mais viáveis (CHURCH, 2007). Essa etapa pode variar entre seis meses a cinco anos e nela são definidos aspectos espaciais de localização dos talhões, os volumes de corte, a sequência da colheita, identificação das estradas a serem utilizadas, distâncias médias de transporte e maquinário que serão utilizados, com seus custos e rendimentos (MACHADO, 2014).

No nível mais baixo da hierarquia está o planejamento operacional. Nele são contemplados planos diários, semanais, mensais ou anual que são necessários para implementar, efetivamente, uma ação de gerenciamento (BETTINGER et al., 2009). De acordo com Machado (2014), essa etapa deve ter grau de detalhamento proporcional à importância da operação e das dificuldades esperadas para o cumprimento das metas de produção, devendo-se identificar os seguintes fatores relevantes:

- Volume de madeira a ser colhido;
- Capacidade e suporte dos solos;
- Marcação e identificação dos eitos de corte;
- Determinação da melhor forma de retirada da madeira;
- Determinação das rotas de extração;

- Determinação da direção, sentido e distância média de extração;
- Informações pluviométricas;
- Disponibilidade de máquinas, equipamentos e mão-de-obra; e,
- Identificação de pontos restritos para a operação de colheita.

Na FIGURA 2 tem-se um resumo ilustrativo das decisões de planejamento estratégico, tático e operacional necessárias na cadeia de valor da floresta no manejo florestal, colheita e transporte.

FIGURA 2 - MATRIZ DE PLANEJAMENTO SIMPLIFICADO DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO MANEJO FLORESTAL, COLHEITA E TRANSPORTE.

Planejamento estratégico	Planejamento tático	Planejamento operacional
• Estratégia de produção de madeira • Contratos de compras e aquisições de floresta • Estratégia de regime silvicultural • Tecnologia de colheita e transporte • Capacidade de investimento • Estratégia de transporte (Ex: construção de estradas, terminais, embarcações)	• Plano de abastecimento • Alocação de equipamentos de colheita e transporte para áreas de corte • Definição de rotas	• Planejamento detalhado do fornecimento de madeira • Seleção e roteamento diário da floresta para indústria/cliente

FONTE: Adaptado de D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST (2011).

De maneira geral, os planos estratégicos devem ser revisados somente quando houver necessidade de reavaliar a posição estratégica da organização, ou seja, eles são pouco frequentes. Em contrapartida, os planos táticos e operacionais, cujo objetivo consiste em encontrar formas mais eficientes de atingir os objetivos estratégicos da organização, devem ser mais flexíveis e capazes de responder a mudanças de informações e condições, pois é impossível prever tudo o que pode acontecer (MCDILL, 2014). Mas, ainda de acordo com o mesmo autor, se um plano for muito flexível, não há responsabilização, podendo levar a organização não atingir seus objetivos estratégicos.

3.2. PESQUISA OPERACIONAL

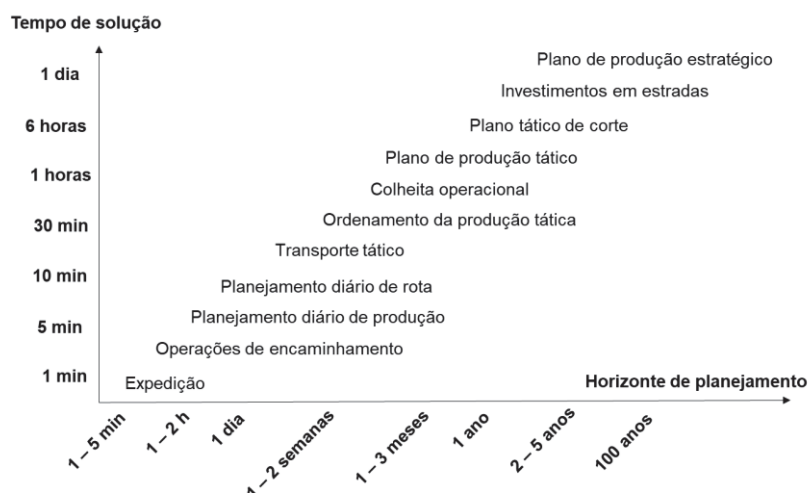
Em decorrência dos problemas de gerenciamento florestal envolverem graus de complexidade diversos, relacionados às iterações temporais e espaciais de produção, isto faz com que o planejamento isolado para cada povoamento florestal não seja suficiente (BUONGIORNO; GILLES, 2003). Em vista disso, torna-se necessário o uso de métodos de análise que auxiliem na elaboração de planos operacionais realistas que consigam trabalhar com diferentes restrições em um único problema, tendo como destaque a utilização da Pesquisa Operacional (PO) como ferramenta de apoio a tomada de decisão (BANHARA et al., 2010).

O termo Pesquisa Operacional está associado a aplicação de técnicas matemáticas que resolvam problemas de decisão, representados e analisados por meio de modelos (ARCE, 1997). Os primeiros modelos de PO foram desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial, para auxiliar nas operações militares de defesa da Grã-Bretanha contra os ataques da força aérea alemã (*Luftwaffe*) (LARNDER, 1984). Após a guerra, os métodos de PO começaram a ser aplicados com sucesso nas indústrias, agricultura e governo (BUONGIORNO; GILLES, 2003) e até hoje estão presentes em grande parte da rotina diária da sociedade.

Os modelos de planejamento buscam selecionar a melhor solução possível para um problema sujeito a uma ou mais restrições. Todavia, a formulação de um cenário que descreva o mundo real de maneira adequada, e que seja resolvido dentro dos limites de tempo viáveis e com qualidade de solução, representam um problema difícil (MCDILL, 2014; RÖNNQVIST, 2003), uma vez que são limitados por restrições concorrentes, como: rendimento; custos logísticos; e, níveis de serviço (D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011).

O tempo razoável de processamento dos modelos varia de acordo com o tipo de problema. Como o horizonte de planejamento de um problema pode variar desde períodos muito curtos (minutos) a muito longos (várias centenas de anos), os planos requerem diferentes tempos de processamento (D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011), conforme pode ser visto na FIGURA 3. Em problemas operacionais, tradicionalmente são selecionadas heurísticas, meta-heurísticas e métodos de rede, enquanto que programação linear inteira mista e métodos de programação estocástica são melhores empregados para problemas de planejamento tático e estratégico (RÖNNQVIST, 2003; D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011).

FIGURA 3 - TEMPOS DE SOLUÇÃO NECESSÁRIOS EM RELAÇÃO AO PERÍODO DE PLANEJAMENTO DE ATIVIDADES FLORESTAIS.



FONTE: Adaptado de D'Amours; Epstein; Rönnqvist (2011).

3.2.1. Programação linear e extensões

A Programação Linear (PL) é um dos métodos mais empregados na PO. Pode ser considerada como uma revolução da humanidade, uma vez que proporcionou a capacidade de estabelecer metas gerais e indicar um caminho de decisões detalhadas a serem tomadas para "melhor" alcançar objetivos complexos (DANTZIG; THAPA, 1997). A PL pode ser definida também como um método para alocar recursos limitados para atividades concorrentes de maneira ótima (BUONGIORNO; GILLES, 2003). Seu êxito deve-se, especialmente, à flexibilidade de descrever uma grande quantidade de situações reais em diversas áreas, como: militar, industrial, agrícola, florestal, de transporte, economia, de sistemas de saúde e até mesmo nas ciências sociais e do comportamento humano (ARCE, 1997).

A primeira maneira prática de resolver problemas lineares foi realizada por meio da aplicação do método Simplex, idealizado por George Dantzig no final da década de 1940, e até hoje equivale a uma das técnicas de otimização mais tradicionais e básicas para resolver um sistema de equações lineares. O método Simplex¹ é um processo iterativo que permite melhorar a solução da função objetivo até atingir a solução ótima do problema, satisfazendo as restrições estabelecidas. Em vez de calcular todas as soluções viáveis básicas de um problema, que é impraticável

¹ Conteúdo detalhado em: DANTZIG, G. **Linear programming and extensions**. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1963.

para grandes problemas - mesmo com computadores rápidos-, o método simplex consiste em passar de um ponto extremo para o próximo ponto extremo adjacente, da região desejável, na direção que mais aumenta a função objetivo Z (BUONGIORNO; GILLES, 2003). As iterações continuam até que nenhuma melhoria ocorra.

Os problemas de PL envolvem a otimização de uma função objetivo linear sujeita a um conjunto de igualdades lineares e/ou desigualdades, na qual as variáveis de escolha (as incógnitas) não devem ser negativas (LEUSCHNER, 1990; DANTZIG; THAPA, 1997). A função objetivo auxilia na avaliação da qualidade de uma solução para um problema, que considera todas combinações potenciais de ações de gerenciamento que atenda um conjunto de restrições (BETTINGER et al., 2009).

A formulação exata das restrições pode variar de um problema para outro, porém os problemas de programação linear podem ser representados da seguinte forma padrão (LEUSCHNER, 1990):

$$\text{Minimizar ou Maximizar } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Sujeito a

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq r_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq r_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq r_m \\ x_i &\geq 0; \\ j = 1, 2, \dots, n; \quad i &= 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

Em que: Z : Função objetivo; x_j : Variáveis de escolha; c_j : Coeficiente que mede a contribuição da j -ésima variável de escolha para a função objetivo; r_i : Restrições do problema; a_{ij} : Coeficientes que medem o efeito da i -ésima restrição na j -ésima variável de escolha.

As variáveis e equações dos modelos de PL são guiadas por quatro pressuposições básicas (BETTINGER et al., 2009):

- Proporcionalidade – cada variável está associada a um coeficiente (por exemplo, receita por unidade produzida, custo por quilômetro de estrada

construída) e a contribuição de cada produto para a função objetivo é proporcional ao número de unidades, de cada objeto, produzido.

- Aditividade – cada variável contribui de forma independente das demais variáveis.
- Divisibilidade – as variáveis de decisão podem assumir qualquer valor real não-negativo (inteiro ou fracionário).
- Exatidão - os coeficientes associados a cada variável devem ser conhecidos.

Embora a programação linear seja um método amplamente utilizado nas mais diversas áreas, há problemas de decisão que apenas fazem sentido quando assumem valores inteiros, infringindo o princípio da divisibilidade da PL (CEZANA, 2013). Todavia, quando todas as variáveis de decisão envolvidas necessitam apresentar valores inteiros ou binários, o modelo é classificado como um problema de programação linear inteira (PLI), ou se apenas algumas variáveis precisam apresentar características discretas, o processo é definido como programação linear inteira mista (PLIM) (LEITE et al., 2013).

A formulação dos modelos de PLI e de PLIM são semelhantes quando comparado com a formulação dos modelos de PL, o que as diferencia, no entanto, é a incorporação de restrições que exigem que determinadas variáveis assumam valores inteiros (0,1,2,3,...) ou valores binários (0 ou 1) (LEITE et al., 2013).

Entre os vários métodos usados para solução de modelos de PLI ou PLIM, destacam-se os métodos de *branch and bound* e o *cutting plane*, ao invés do método simplex (BETTINGER et al., 2009). Todavia, em alguns casos, os problemas de PLIM não podem ser resolvidos com o algoritmo de *branch and bound* e o *cutting plane*, sendo necessário recorrer a técnicas heurísticas que, em muitos casos, podem encontrar soluções quase ótimas de forma muito eficiente (MCDILL, 2014).

3.2.2. Métodos heurísticos

Um dos grandes avanços recentes no campo da pesquisa operacional tem sido o rápido progresso na criação de algoritmos heurísticos muito eficientes (comumente chamados meta-heurística) para diversos problemas combinatórios como os problemas de PLI (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). De acordo com a complexidade computacional de alguns problemas de planejamento, às vezes, pode-

se sugerir o uso de heurísticas, uma vez que essas técnicas podem ser mais flexíveis e capazes de abordar funções e restrições objetivas mais complicadas que algoritmos exatos (MCDILL, 2014). Os métodos de solução heurística utilizam lógica e regras para obter soluções viáveis e eficientes para problemas complexos de planejamento (BETTINGER et al., 2009). Todavia, a solução do problema não corresponde, necessariamente, a uma resposta ótima, no entanto um método heurístico bem elaborado é capaz de apresentar solução próxima da ótima ou concluir pela inexistência de uma solução viável (LEITE et al., 2013).

De acordo com Bettinger et al. (2009), há duas razões típicas pelas quais as heurísticas são selecionadas como ferramenta de planejamento: deseja-se adicionar no processo de planejamento relações quantitativas de difícil implementação em equações lineares; e busca-se gerar uma solução rápida para um problema complexo. Entretanto, de acordo com Hillier e Lieberman (2006), as heurísticas apresentam um inconveniente de que, quando um procedimento de melhoria é aplicado a um problema de otimização com soluções ótimas locais múltiplas, o procedimento convergirá para um ótimo local e processará os valores nesta região. Porém o ponto ótimo local a ser selecionado dependerá de onde o procedimento começa a fazer a busca. Portanto, o método encontrará o ótimo global apenas se, por acaso, ele começar a busca nas vizinhanças desse ótimo global. E, ainda de acordo com os mesmos autores, para superar esse inconveniente, recomenda-se repetir o procedimento diversas vezes para aumentar a chance de se obter o melhor dos ótimos locais, ou seja, o ótimo global.

REFERÊNCIAS

- ARCE J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando a minimização de custos**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- BANHARA, J. R.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F.; MOREIRA, J. M. A. P.; SILVA, L. M. S. da S.; NOBRE, S. R.; COGSWELL, A. Optimized harvest scheduling in eucalyptus plantations under operational, spatial and climatic constraints. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 85, p. 85–95, 2010.
- BEAUDOIN, D.; FRAYRET, J.-M.; LEBEL, L. Hierarchical forest management with anticipation: an application to tactical–operational planning integration. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 38, n. 8, p. 2198–2211, 2008.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest management and planning**. Nova Iorque: Academic Press, 2009.
- BOYLAND, M. **Hierarchical planning in forestry**. Vancouver: Department of Forest Science, The University of British Columbia. 2003.
- BUONGIORNO, J.; GILLESS, K. J. **Forest management and economics: a primer in quantitative methods**. New York: Collin Mcmillan, 1987. 284p.
- BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. **Decision methods for forest resource management**. Academic Press, 2003.
- CEZANA, D.P. **Aplicação do modelo de roteamento de veículos no planejamento da colheita florestal**. Jerônimo Monteiro, ES, 2013. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal do Espírito Santo.
- CHURCH, R. Tactical-level forest management models. In: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJØRNDAL, T.; EPSTEIN, R. **Handbook of operations research in natural resources**. Springer, 2007. p. 342-363.
- CLUTTER, J.L.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.
- D'AMOURS, S.; EPSTEIN, R.; RÖNNQVIST, M. Operations Research in Forestry and Forest Products Industry. **Information systems and operational research**, v. 46, n. 4, p. 265–281, 2011.
- DANTZIG, G. B.; THAPA, M. N. **Linear programming**. New York: Springer-Verlag New York, 1997.

DEMERS, C.; LONG, A.; CLAUSEN, R. What is in a natural resource management plan school of forest resources and Conservation, Florida Cooperative Extension Service, **Institute of food and agricultural sciences**, University of Florida, Gainesville, FL. Extension Report SS-FOR-14, 2001.

DRUCKER, P. F. **O melhor de Peter Drucker a administração**. São Paulo: Nobel, 2001. Disponível em: <
https://books.google.com.br/books?id=CCORvXvPHJUC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 13 de set. de 2017.

GOLDBARG, M.C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

IBÁ. Relatório 2014. **Relatório**. São Paulo. 2014.

IBÁ. Relatório 2017. **Relatório**. São Paulo. 2017.

LARNDER, H. Forum: The origin of operational research. **Operations Research**, v. 32, n. 2, p. 465-476, 1984.

LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. da S.; MONTE, M. A.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A. Regulação da produção florestal. In: VALE, A. B. do.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. de P. **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa: SIF, 2013. P. 315-326.

LEUSCHNER, W. A. **Forest regulation, harvest scheduling, and planning techniques**. New York: Wiley, 1990. 281 p.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. 3 ed. UFV, 2014. 543p.

MARQUES, A. S.; AUDY, J. F.; D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M. Tactical and operational harvest planning. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The Management of industrial forest plantations**. Springer, 2014. p.239-267.

MCDILL, M. E. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The management of industrial forest plantations**. Springer, 2014. p. 27-59.

MITCHELL, S. A. **Operational forestry harvest scheduling optimization – A mathematical model and solution strategy**. 252f. Thesis - University of Auckland, Auckland, 2004.

ÖHMAN, K. **Forest planning with consideration to spatial relationships**. 32 f. Thesis - Department of Forest Resource Management and Geomatics, Swedish University of Agricultural Sciences, 2001.

RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical Programming**, v. 97, n. 1–2, p. 267–284, 2003.

SCHNEIDER, P.R. **Manejo florestal: Planejamento da produção florestal**. Santa Maria: CEPEF/FATEC/UFSM. 2009. 613p.

4. AGENDAMENTO TÁTICO DA COLHEITA FLORESTAL EM POVOAMENTO DE *Pinus* spp.²

RESUMO

Conduziu-se este estudo com o propósito de avaliar o resultado de diferentes funções objetivo no agendamento tático da colheita florestal de *Pinus* spp., visando atender a demanda industrial, fatores econômicos e ambientais de uma empresa de celulose. A área de estudo foi de 3.714,68 hectares de florestas localizada no estado de Santa Catarina, Sul do Brasil. No processamento dos modelos matemáticos foram utilizadas variáveis de entrada baseadas em talhões e blocos, e testadas em quatro diferentes estratégias: (1) minimização de custos, (2) maximização do volume, (3) minimização da oscilação volumétrica ao longo do horizonte de planejamento e (4) minimização da dispersão das áreas de colheita. Os problemas foram resolvidos com base na programação linear inteira mista, seguindo a formulação do modelo Tipo I, para o sequenciamento anual das operações de colheita. O cenário que minimizou a oscilação do volume por blocos apresentou a melhor solução, uma vez que resulta numa produção equilibrada ao longo do horizonte de planejamento, limita custos de oportunidade relativos à compra de matéria-prima do mercado, minimiza perdas econômicas pertinentes às pausas no processo produtivo associadas ao deslocamento das frentes de trabalho, além de resultar em distribuição espacial dos blocos mais adequada em níveis operacional e ambiental. A abordagem de problemas operacionais de planejamento sem acréscimo de restrições espaciais nas funções matemáticas, mas com o apoio de um Sistema de Informações Geográficas, permitiu avaliar previamente a viabilidade dos resultados obtidos, oportunizando formulações menos complexas e que possam se ajustar às exigências ambientais pretendidas.

Palavras-chave: Planejamento florestal; Programação Linear Inteira Mista; Técnicas e Operações Florestais.

² Esse capítulo foi submetido de maneira integral em uma revista científica, o qual está sob avaliação.

ABSTRACT

This study evaluated the behavior of different objective functions of tactical scheduling in plantations *Pinus* spp., to meet the industrial demand, economic and environmental factors of a pulp company. The study area was 3,714.68 hectares of forests, located in the state of Santa Catarina, southern Brazil. In the processing of the mathematical models, input variables based on stands and blocks were used and tested in four different strategies: (1) minimization of costs, (2) volume maximization, (3) minimization of volumetric oscillation over the planning horizon, and (4) minimization the distance between the work fronts in the harvesting operation. The problems were solved based on a model of mixed-integer linear programming following the formulation of the Type I model, for the annual sequencing of harvesting operations. The scenario that minimized the volume oscillation by blocks presented the best solution, since it results in a balanced production along the planning horizon, limits opportunity costs related to the purchase of raw material from the market, minimizes economic losses that are pertinent to pauses in the productive process associated with the displacement of the work fronts, as well as reflecting in a more balanced spatial distribution of the blocks, both at the environmental and operational levels. The approach to operational planning problems without adding spatial constraints to mathematical functions, but with the support of a Geographic Information System, has made it possible to evaluate the feasibility of the results obtained in advance, providing less complex formulations that can meet the environmental requirements.

Keywords: Forest Planning; Mixed-Integer Linear Programming; Techniques and Forest Operations.

4.1. INTRODUÇÃO

A base florestal brasileira é mundialmente reconhecida pela alta produtividade anual de suas áreas plantadas e pela menor rotação para corte final (IBÁ, 2017). Todavia, apesar da hegemonia mundial, nos últimos anos, a produção de madeira ficou mais cara no país. Os custos setoriais entre os anos de 2014 e 2015 cresceram 2,1 pontos percentuais a mais do que a inflação nacional, medida pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor (IBÁ, 2016). Assim, assegurar a competitividade da indústria florestal torna-se um grande desafio, principalmente quando há dependência do mercado de exportação (RÖNNQVIST, 2003).

O planejamento, como um processo de tomada de decisão, exerce fundamental importância para a sustentabilidade dos empreendimentos florestais, tendo em vista a redução das incertezas (BANHARA, 2010). Mesmo podendo ser feito em diferentes escalas, tais como estratégico, tático e operacional, os planos devem ser coerentes à medida que se tornam mais e com menor horizonte temporal de execução (BATEMAN; SNELL, 2012; MCDILL, 2014).

Uma das principais fases do planejamento da produção florestal refere-se ao agendamento da colheita, pois envolve uma elevada representatividade no custo final do produto e possibilita a otimização das operações, bem como a minimização dos impactos ambientais (MACHADO, 2014; AUGUSTYNCZIK et al., 2015). Além de preocupações com a produção de madeira e a capitalização de recursos financeiros, nos últimos anos, as questões ambientais vêm sendo incorporadas nos planos de agendamento da colheita (GOMIDE, 2009). O cuidado com o ambiente tem se tornado um fator preponderante na sustentabilidade do mercado florestal. Além de preocupações com a capitalização de recursos financeiros e com a produção de madeira, tem-se destacado a importância de mitigar o impacto ambiental da colheita em termos de erosão e estética da paisagem (MARQUES et. al., 2014).

Na literatura é possível encontrar uma série de estudos aplicados à problemas de agendamento florestal que avaliam a distribuição espacial das áreas de corte relacionadas a fatores de abastecimento e produção (MCDILL et al., 2002; CHEN et al., 2002; BASKENT e KELLES, 2005; VIELMA et al., 2007; BANHARA et al., 2010; GOMIDE et al., 2010; LI et al., 2010; AUGUSTYNCZIK et al., 2015; YOSHIMOTO e KONOSHIMA, 2016). Práticas que envolvem distribuição espacial sugerem, tradicionalmente, o uso de restrições de adjacência espacial para limitar o tamanho

da área de corte, cuja melhor maneira de lidar com esses objetivos no planejamento é incluí-los diretamente no problema de otimização (KURTTILA, 2001).

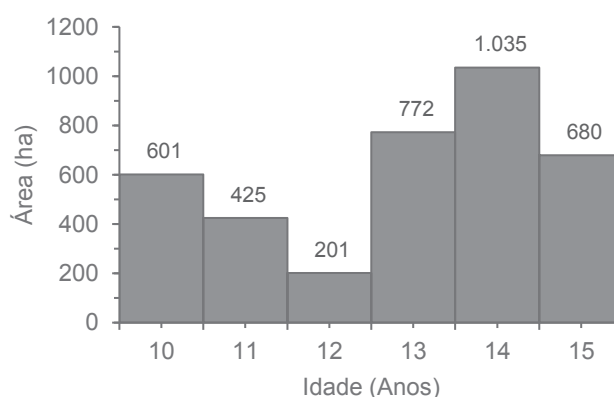
Todavia, essas estratégias de desenvolvimento exigem esforços adicionais de formulação, em que planos podem ser difíceis de serem implementados (BASKENT; JORDAN, 1996). Uma forma alternativa de considerar objetivos espaciais é encontrar, inicialmente, uma solução ideal para um modelo sem incluir restrições espaciais e, posteriormente, verificar a viabilidade da distribuição geográfica dos resultados obtidos (BETTINGER et al., 1996; KURTTILA, 2001). Assim, o presente estudo teve como propósito avaliar o comportamento de diferentes funções objetivo de agendamento tático da colheita que atendam a demanda industrial, fatores econômicos e ambientais de uma empresa de celulose.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Área de estudo

Este estudo foi desenvolvido com dados de povoamentos de *Pinus* spp. de uma empresa de celulose localizada no estado de Santa Catarina, Sul do Brasil, que destina a matéria-prima ao abastecimento de sua planta. O ciclo de manejo, de plantio ao corte raso, é de 15 anos e sem a aplicação de desbaste. A área total considerada neste trabalho foi de 3.714,68 ha, sendo subdividida em 1.139 talhões com idades de 10 a 15 anos (FIGURA 4).

FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO INICIAL DAS CLASSES DE IDADE DO POVOAMENTOS DE *Pinus* spp.



FONTE: O autor (2018).

4.2.2. Obtenção da matriz de distância

Para o desenvolvimento do trabalho, foi necessário obter a matriz de distâncias entre os talhões e blocos, em que, para a formação dos blocos, os talhões foram agrupados em polígonos de mesma idade e localidade. Em situações que os talhões se apresentaram dispersos dos blocos e possuíam áreas menores que cinco hectares, eles foram unificados aos blocos mais próximos.

O centro de cada polígono foi considerado como o ponto de referência para talhões e blocos, visando determinar a matriz de distâncias via Sistema de Informações Geográficas (SIG). Para isso, utilizou-se a ferramenta centróide, com a opção *Inside* habilitada, do software ArcGIS versão 10.5 (ESRI, 2017). Diante das

várias possibilidades de caminhos consolidados que a frente de colheita pode adotar para se deslocar de uma unidade e outra, foi considerada a rota de menor distância entre as localidades, utilizando-se a extensão *Network Analyst* do *software* ArcGis 10.5.

4.2.3. Classificação de declividade

Para efeitos de diferenciação dos custos operacionais obtidos na colheita florestal em diferentes declividades de terreno, a área de estudo foi classificada em duas categorias de relevo, de acordo com a prática adotada pela empresa e relacionada com os custos operacionais da colheita de madeira. Assim, talhões que apresentaram 50% da área com declividade inferior a 15% foram classificadas como planos; ao passo que os demais foram considerados ondulados.

4.2.4. Parâmetros

Os sortimentos utilizados como padrão de processamento foram classificados como processo (8 a 28 cm de diâmetro com base na ponta fina e comprimento de 2,4 m) e serraria (acima de 28 cm com comprimento de 2,6 m). O sortimento processo é utilizado unicamente para o abastecimento da indústria e todo excedente relacionado ao sortimento toras, quando existente, é destinado para venda no mercado, não havendo o compromisso de atender demanda específica desse produto. Ou seja, tem-se como objetivo abastecer à indústria de celulose e adicionalmente maximizar o resultado econômico do planejamento por meio da venda do sortimento excedente. Assim, as metas de produção anual foram estabelecidas para abastecimento da indústria, em um horizonte de planejamento de cinco anos, delimitado em 337.500 toneladas de madeira de processo para o primeiro ano e 450.000 toneladas para os demais quatro anos.

Foi considerado o fator 0,95 para conversão de metro cúbico para tonelada. Posteriormente, as estimativas de produção foram determinadas por meio do *software* SisPinus® (EMBRAPA, 2017), acionado internamente pelo OpTimber-LP, versão 2017. 4. 48 (OPTIMBER, 2017).

A taxa de juros foi fixada em 10% ao ano em todos os cenários simulados. Adicionalmente, como dados de entrada para o processamento dos cenários deste

estudo, foram utilizados os preços e os custos praticados pela empresa no ano de 2016. Os custos operacionais da colheita de madeira foram, respectivamente, de R\$ 20,78 e R\$ 25,70 por tonelada de madeira cortada em áreas planas (abaixo de 15% de declividade) e onduladas (acima de 15% de declividade). O levantamento dos custos de frete posto em fábrica foram aplicados apenas para o volume de processo, em que os valores variaram de acordo com a localidade de cada talhão e bloco, apresentando média de R\$ 7,84 por tonelada. O valor montante utilizado para a compra de madeira de processo do mercado consistiu em R\$ 70,00 por tonelada. Em contrapartida, o valor adotado para a venda de toras para serraria foi relativo a R\$ 132,50 por tonelada.

Para a composição do cálculo dos custos presentes, considerados em cada simulação, utilizou-se o somatório do: custo de produção; custo de compra de madeira de processo do mercado; e, custo de frete.

4.2.5. Modelo de otimização

Com o uso de em um computador com processador Intel® Core™ Duo CPU 2,93 GHz e 4Mb de memória RAM, o problema foi resolvido utilizando-se a Programação Linear Inteira Mista (PLIM), seguindo-se a formulação do modelo Tipo I (JOHNSON; SCHEURMANN, 1977) para o sequenciamento anual das operações de colheita das unidades selecionadas para o planejamento tático. O agendamento da colheita florestal requereu o uso de variáveis binárias {0,1}, em razão da necessidade de colher totalmente uma unidade de manejo, conforme a exigência do regime adotado.

Diferentes cenários de otimização foram simulados para avaliar o desempenho do agendamento da colheita (TABELA 1).

TABELA 1 – CENÁRIOS UTILIZADOS PARA O AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA DE *Pinus* spp.

Funções objetivo	Cenários		
	Blocos	Talhões	Equações
Minimizar o custo presente geral, considerando o preço de compra e frete	A	E	[1]
Maximizar a produção total de madeira para a indústria e venda para o mercado	B	F	[2]
Minimizar as oscilações de volume ao longo dos anos	C	G	[3]
Minimizar a dispersão da colheita florestal	D	H	[4]

FONTE: O autor (2018).

Todas as funções objetivo foram sujeitas à restrição [5], que garante a obtenção do volume mínimo demandado para o abastecimento da indústria ao longo do horizonte de planejamento. Enquanto que as equações [6], [7] e [8] são as restrições de singularidade, assegurando que as unidades de manejo sejam colhidas em sua totalidade. Assim os modelos de programação matemática empregados foram:

Função objetivo 1: Minimizar o custo presente geral, considerando o preço de compra e frete:

$$\begin{aligned}
 MinZ = & \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S [(1+t)^{-k} Compr_{kls} PCM_{kls}] \\
 & + \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S Frete_{rs} \sum_{r=1}^R \sum_{l=1}^L [(1+t)^{-k} YKLS_{klrs}] \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (CP_{ij} X_{ij}) \\
 CP_{ij} = & \sum_{k=1}^K [(R_{ijk} - C_{ijk}) / (1+t)^{-k}]
 \end{aligned} \tag{1}$$

Em que: *i*: Índice dos estratos a serem colhidos; *b*: Índice dos blocos a ser colhido, considerando também um bloco para cada talhão nos Cenários E até H; *j*: Índice do regime de manejo; *k*: Período anual de planejamento; *l*: Número de produtos florestais; *s*: Número de destino; *r*: Número de regiões; *B*: Número total de blocos; *J*: Número total de regimes; *K*: Número total de anos do horizonte de planejamento de planejamento; *L*: Número total de produtos florestais; *S*: Número total de destinos; *R*:

Número de regiões; t : Taxa anual de juros; $Compra_{kls}$: Volume de compra (ton) de madeira de terceiros do produto l , no ano k , para o destino s ; PCM_{kls} : Custo [R\$/ton] de compra de madeira do produto l , no ano k , no destino s ; $YKLS_{klrs}$: Volume total (ton) de madeira do produto l , região r , destino s , no ano k ; $Frete_{rs}$: Custo do frete (R\$) referente a região r para o destino s ; CP_{ij} : Custo de produção (R\$/ha) no estrato i com regime j ; R_{ijk} : Receita presente (R\$/ha) obtida com a venda de madeira de tora (diâmetro ponta fina de 28cm e com comprimento de 2,60 m) para terceiros referente ao estrato i , ano k , com regime j ; C_{ijk} : Custo presente (R\$/ha) obtido com a produção de madeira de todos os estratos i , no ano k , com regime j ; X_{ij} : Representa a área (ha) do povoamento no estrato i com regime j .

Função objetivo 2: Maximizar a produção total de madeira para a indústria e venda para o mercado:

$$Max Z = \sum_{i=1}^{i \in r} \sum_{j=1}^J X_{ij} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L v_{ijkl} \quad [2]$$

Em que: v_{ijkl} : Volume (ton/ha) potencial total existente no estrato i , do produto l , no ano k , com regime j .

Função objetivo 3: Minimizar as oscilações de volume ao longo dos anos:

$$\begin{aligned} Min Z &= MinMax - MaxMin & \forall k \geq 2 \\ \sum_{i=1}^{i \in r} \sum_{j=1}^J X_{ij} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L v_{ijkl} &\leq MinMax \\ \sum_{i=1}^{i \in r} \sum_{j=1}^J X_{ij} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L v_{ijkl} &\geq MaxMin \end{aligned} \quad [3]$$

Em que: $MinMax$: Menor das produções máximas (ton) possíveis no horizonte de planejamento; $MaxMin$: Maior das produções mínimas (ton) possíveis no horizonte de planejamento.

Função objetivo 4: Minimizar a dispersão da colheita florestal:

$$\text{Min } Z = \text{MaxRaioColheita}$$

$$\text{DISTBLK}_{b_1b_2} * \text{BINDISTBLK}_{b_1b_2k} < 2 * \text{MaxRaioColheita} \quad \forall k \quad \forall b_1, b_2 \quad \forall b_2 \neq b_1 \quad [4]$$

$$\text{BINBLK}_{b_1k} + \text{BINBLK}_{b_2k} - \text{BINDISTBLK}_{b_1b_2k} \leq 1 \quad \forall b_1, b_2 \quad \forall b_2 \neq b_1 \quad \forall k$$

Em que: *MaxRaioColheita*: Limite de distância (Km) máxima de madeira; *DISTBLK_{b₁b₂}*: Distância (km) entre os blocos *b₁* e *b₂*; *BINDISTBLK_{b₁b₂k}*: Variável binária: 1, caso o trecho de estrada entre o par de blocos *b = 1* e *b = 2* seja usado no ano *k*; 0, caso contrário; *BINBLK_{b₁k}*: Variável binária que assume valor 1 se o blocos *b₁* seja escolhido para fazer parte da solução no ano *k*, ou valor 0 caso contrário; *BINBLK_{b₂k}*: Variável binária que assume valor 1 se o blocos *b₂* seja escolhido para fazer parte da solução no ano *k*, ou valor 0 caso contrário.

Sujeito a:

$$\text{DEMANDA}_{ks} = \sum_{l=1}^L \text{FTIKLS}_{kls} * \left(\sum_{r=1}^R \text{YKLS}_{klrs} + \text{Compra}_{kls} \right) \quad \forall k, s \quad [5]$$

$$\sum_{s=1}^S \text{YKLS}_{klrs} = \sum_{i \in r}^I \sum_{j \in J}^J (X_{ij} v_{ijkl})$$

$$\sum_{k=1}^K \text{BINBLK}_{bk} \leq 1 \quad \forall b \quad [6]$$

$$\sum_{i=1}^{i \in b} \sum_{j=1}^{j \in i} X_{ij} + \text{OCIOBLK}_{bk} = \text{BINBLK}_{bk} * \text{AREACORTEBLK}_{bk} \quad \forall b, \forall k \quad [7]$$

$$\text{BINBLK}_{b_1k}, \text{BINBLK}_{b_2k}, \text{BINDISTBLK}_{b_1b_2k} \in \{0,1\} \quad \forall b, k \quad [8]$$

Em que: *DEMANDA_{ks}*: Demanda volumétrica (ton) em cada período do horizonte de planejamento *k* e destino *s*; *FTIKLS_{kls}*: Fator de conversão m³ para toneladas; *OCIOBLK_{b_k}*: Representa a área (ha) de corte ociosa no bloco *b*, no ano *k*; *AREACORTEBLK_{b_k}*: Representa a área (ha) de corte no bloco *b*, no ano *k*.

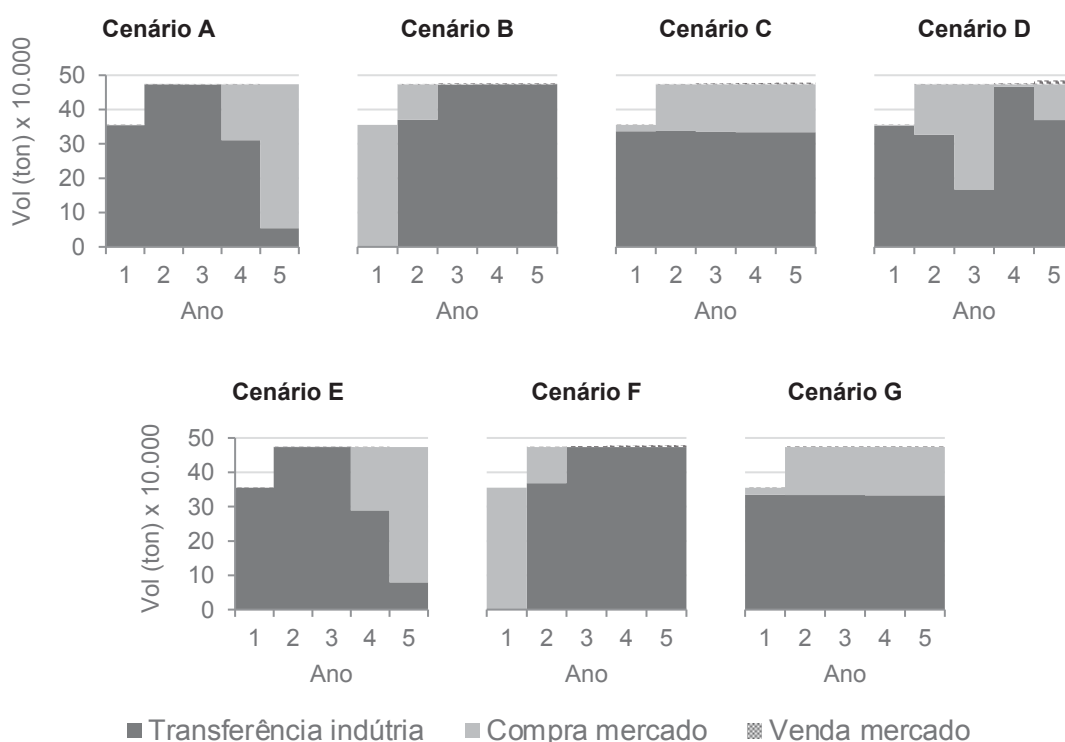
4.3. RESULTADO E DISCUSSÃO

As formulações dos modelos de planejamento que utilizaram blocos como parâmetros de agregação resultaram em 2.917 restrições e 36.253 variáveis de decisão, das quais 27.380 corresponderam a variáveis inteiras. Enquanto as estratégias que consideraram um bloco para cada talhão geraram 9.307 restrições e 6.506.128 de variáveis (6.486.605 variáveis inteiras).

Os modelos resultaram em soluções viáveis para serem aplicadas em todas as estratégias avaliadas (FIGURA 5). Exceto para o Cenário H, que visou minimizar a dispersão da colheita em nível de talhão, apresentando insuficiência computacional para a resolução do problema.

Os cenários simulados utilizaram a área total disponível para suprir a demanda de volume ao longo do horizonte de planejamento. Todavia, é possível observar na FIGURA 5 que, em alguns anos, os cenários não mantiveram os níveis de produção mínima de volume para o abastecimento da indústria (demanda), tornando-se necessária a compra de matéria-prima do mercado.

FIGURA 5 - PRODUÇÃO ANUAL DE VOLUME DE MADEIRA PRODUZIDA AO LONGO DO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.

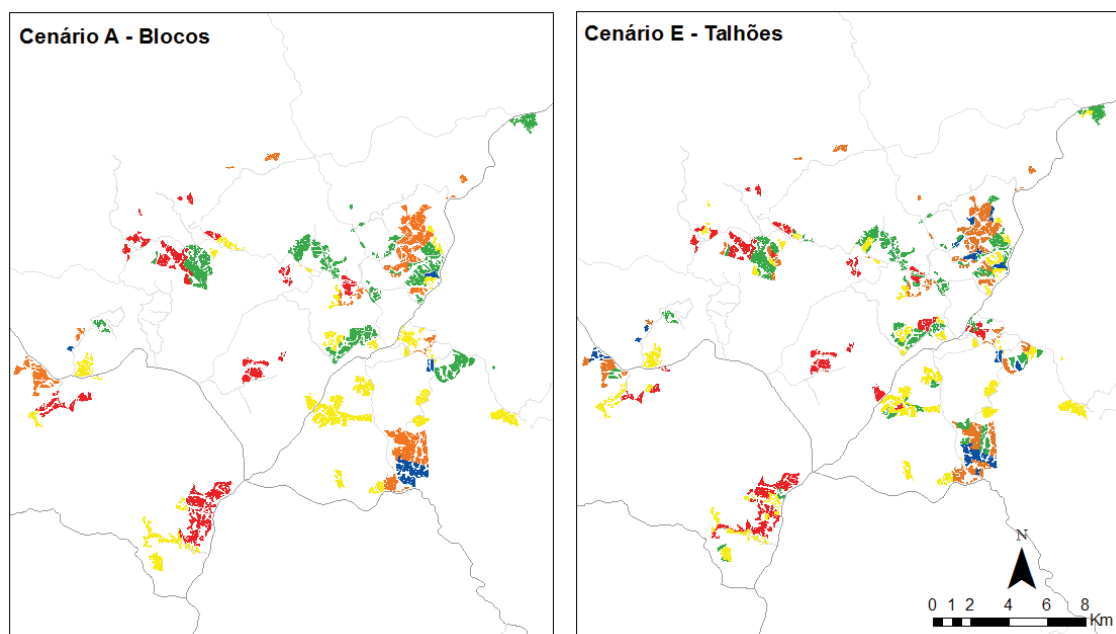


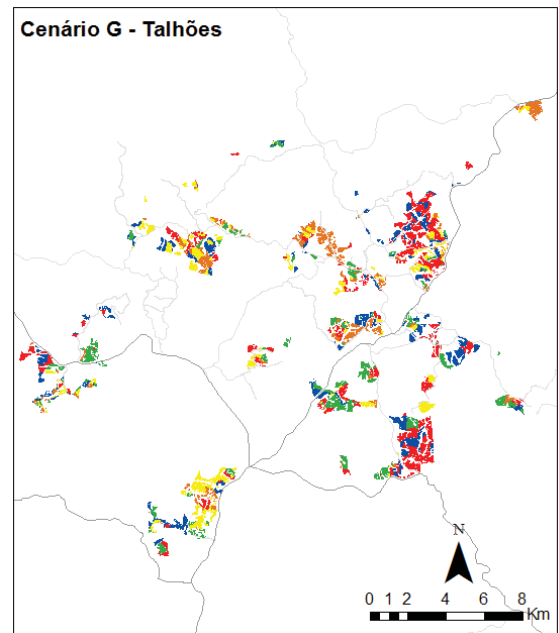
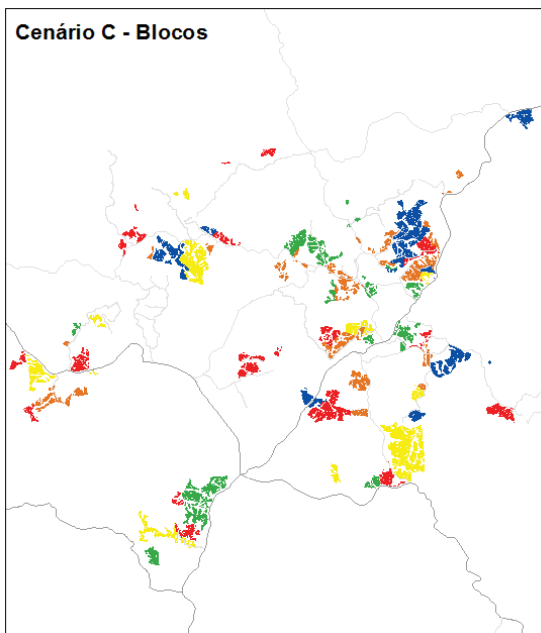
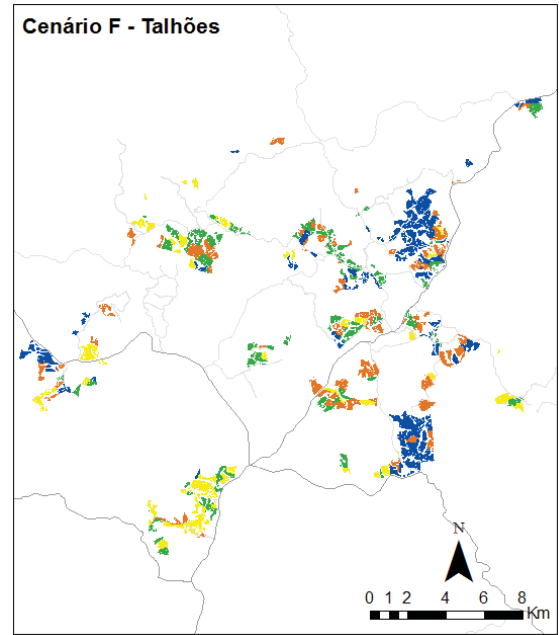
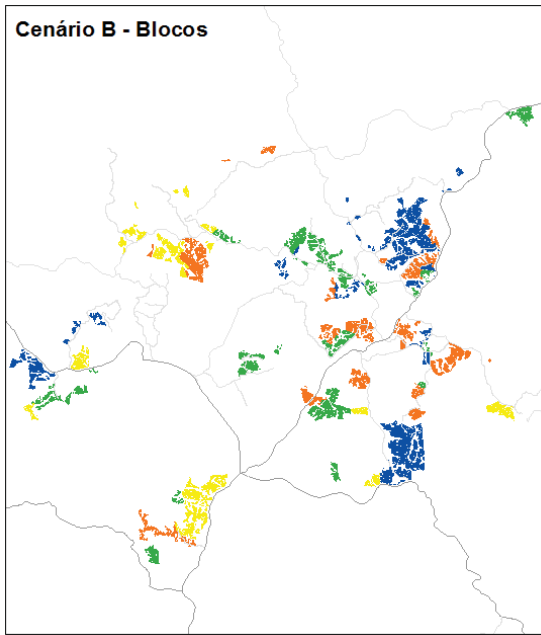
FONTE: O autor (2018).

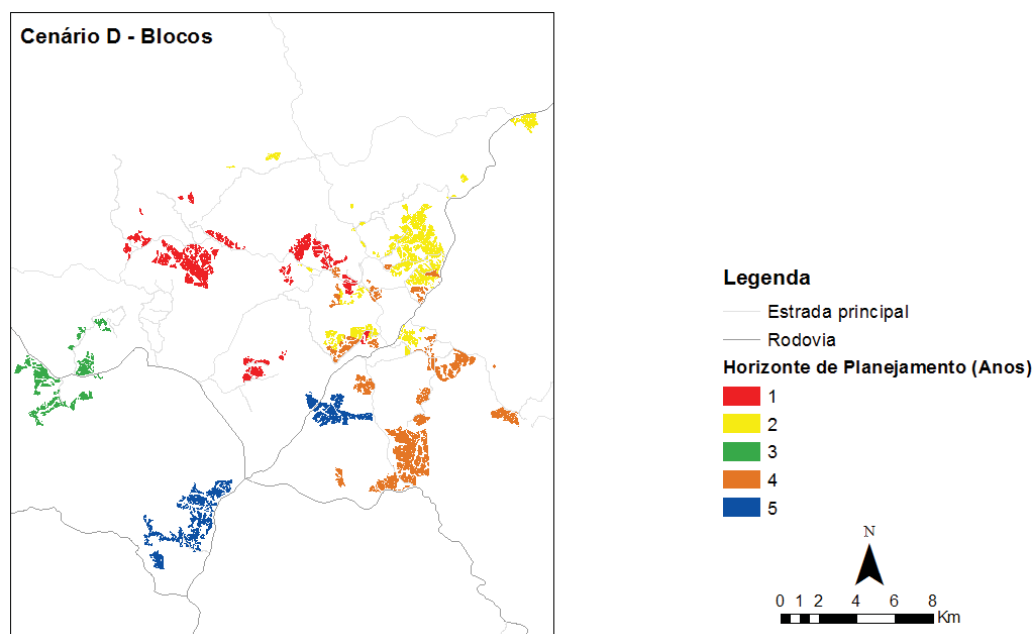
Considerando as estratégias que minimizaram custos por bloco (Cenário A) e talhão (Cenário E), pode-se constatar que houve maior concentração de corte no início do horizonte de planejamento, seguido de queda da produção nos dois últimos períodos. Essa tendência se evidencia pelo decréscimo da variação percentual do valor da floresta ao longo dos anos, até atingir o custo de oportunidade do capital (RODRIGUES, 1991; VIELMA et al., 2007), momento de máximo rendimento da floresta em relação à taxa de juros utilizada. Todavia, se o preço real de venda da madeira aumentar, a condição de corte raso pode resultar em uma maior idade de rotação, caso o capital auferido com a venda possa ser aplicado à taxa utilizada (DIAZ-BALTEIRO et al., 2016).

Em contrapartida, os cenários que resultaram na máxima produtividade do povoamento (Cenários B e F), conforme apresentados na FIGURA 5, anteciparam a compra de madeira, de modo a manter as florestas em pé durante o maior tempo possível, visando obter o máximo volume do povoamento. Dessa maneira, pode-se observar que as aplicações das estratégias supracitadas apresentaram oscilação produtiva, bem como as unidades de manejo configuraram-se espacialmente dispersas ao longo do horizonte de planejamento (FIGURA 6).

FIGURA 6 - AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA DE *Pinus* spp. AO LONGO DE CINCO ANOS DE PLANEJAMENTO.







FONTE: O autor (2018).

A estratégia que minimizou a máxima dispersão da colheita florestal (Cenário D) apresentou a melhor distribuição dos blocos durante os cinco anos de planejamento (FIGURA 6). A incorporação de equações que buscam minimizar a distância da rede de estradas possibilita aumentar a eficiência das operações e reduzir os impactos ambientais da colheita florestal, pois diminuem a movimentação das máquinas entre as frentes de colheita, minimizam o tempo improdutivo de realocação das máquinas e reduzem os custos relacionados à manutenção e construção de estradas (AUGUSTYNCZIK, 2014; SILVA et al., 2016).

Todavia, embora o Cenário D possa ser favorável no âmbito econômico, contraria a combinação desejável de produção de recursos e de valores ambientais gerenciados em mosaicos na floresta. Os impactos gerados na paisagem após a colheita florestal são visíveis, podendo conter extensas áreas com exposição do solo, quebra da continuidade e retalhamento da paisagem, aumento de riscos causados por vendavais, dentre outros (GOMIDE et al., 2013). Além disso, a produção anual de madeira gerada nesse cenário (FIGURA 5) resultou em oscilações elevadas de volume a ser transferido da floresta para a fábrica, atingindo até 96% de diferença do volume a ser colhido entre o segundo e terceiro período.

Considerando os cenários que a função objetivo de equilíbrio volumétrico foi aplicada (Cenários C e G), pode-se constatar que foram capazes de manter os níveis

de produção durante o período considerado (FIGURA 5), embora tenham apresentado dispersão das unidades de corte (FIGURA 6). Além do mais, essas funções penalizaram a obtenção de resultados mais próximos ao da minimização dos custos, bem como em relação aos cenários que maximizaram a produção, uma vez que os pontos discrepantes característicos de cortes nos Cenários A, B, E e F foram equilibrados (FIGURA 5).

Dessa maneira, foi observado que a aplicação dos Cenários C e G geraram aumento dos custos totais em 3,1% e 3,5%, respectivamente (TABELA 2), em relação aos cenários que minimizaram custos. Entretanto, segundo Augustynczik et al. (2015), a manutenção dos níveis de produção durante o horizonte de planejamento é desejável do ponto de vista da empresa, bem como para os produtores florestais, pois garante a continuidade da produção e evita custos de oportunidade e perdas econômicas com interrupções no processo produtivo. Por conseguinte, pode-se observar que esses cenários atingiram a melhor combinação de produção de recursos e valores ecológicos, por meio do equilíbrio de volume e dispersão moderada da colheita em mosaico.

TABELA 2 - RESULTADO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO PARA CADA CENÁRIO DE AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA DE *Pinus* spp.

Estratégias Blocos	Custo presente (R\$ x 1.000.000)	Estratégias Talhões	Custo presente (R\$ x 1.000.000)
Cenário A	64,20	Cenário E	64,10
Cenário B	65,78	Cenário F	65,90
Cenário C	66,17	Cenário G	66,32
Cenário D	66,44	Cenário H	-

FONTE: O autor (2018).

Avaliando o Cenário A em relação ao Cenário E, observa-se (TABELA 2) que a estratégia que utilizou bloco como parâmetro de entrada resultou em custo levemente superior à estratégia que usou talhão, em decorrência da maior necessidade de compra de madeira de processo para o abastecimento da fábrica nos últimos anos. Em contrapartida, com relação aos Cenários B e F, que maximizaram o volume ao longo do horizonte de planejamento, houve maior custo no Cenário F, que utilizou talhão como variável de entrada.

Essas diferenças no impacto do custo presente em relação ao uso de blocos e talhões, estão associadas principalmente a dois motivos: necessidade de compra de madeira do mercado, que custa, em média, 55,6% a mais que o custo de produção

somado com o valor de frete; e, relacionados às características de integralidade utilizadas na formulação dos modelos, visto que um bloco quando agendado deve ser cortado de forma completa, obrigando que fragmentos com diferentes produtividades sejam colhidos em um mesmo período.

Dessa maneira, o Cenário E apresentou menor custo que o Cenário A, em razão da seleção de unidades de áreas menores e com maior índice de homogeneidade. Isso garantiu o corte de áreas mais produtivas nos primeiros anos que em relação ao Cenário A, resultando em maior produção volumétrica, menor necessidade de compra de madeira do mercado e consequente redução dos custos.

Isso também explica os maiores custos do Cenário F em comparação ao Cenário B. Como suas funções objetivo consistiu em maximizar a produção total, o Cenário F foi capaz de manter em pé maior quantidade de unidades de área de maior produtividade durante um maior tempo possível, resultando na obtenção de maior estoque de madeira com diâmetro superior a 28 cm e menor quantidade de madeira de processo, ocasionando, assim, a necessidade de compra de madeira fina para o abastecimento da indústria e, sucessivamente, resultando em maior custo.

Além disso, os custos operacionais assumidos neste estudo consideraram as atuais práticas de colheita florestal utilizadas pela empresa. Sendo assim, a menor mobilização de máquinas, menor necessidade de montar áreas de vivência e minimização de manutenção e construção de estradas podem resultar em custos operacionais menores e, possivelmente, os cenários que utilizaram blocos como parâmetro de avaliação apresentarão menores custos que em relação ao uso de talhões.

Em relação aos cenários que buscaram manter o fluxo de volume balanceado resultou no Cenário G a necessidade de compra de 1,62% de madeira de processo a mais que em relação ao Cenário C, resultando em maior custo final. Esses cenários, diferentemente daqueles que minimizaram custos e maximizaram volume, não possuem uma tendência de seleção de áreas mais produtivas e sim tendem a selecionar as áreas que resultem em uma menor diferença de volume a ser colhido ao longo do horizonte de planejamento.

Portanto, agregar unidades de gestão menores em áreas de maior escala de gerenciamento melhora a eficiência da operação florestal (YOSHIMOTO; KONOSHIMA, 2016), incluindo vantagens operacionais e logísticas por meio da concentração das atividades de colheita (SMALTSCHINSKI; SEELING; BECKER,

2012). Todavia, o desenvolvimento de um conjunto abrangente de projetos que estejam funcionalmente ligados e combinem a produção de recursos juntamente com valores ambientais (BASKENT; JORDAN, 1996), ainda se constitui um desafio fundamental para o agendamento espacial da colheita.

4.4. CONCLUSÕES

Dentre as estratégias abordadas neste estudo, recomenda-se principalmente o Cenário C de minimização das oscilações volumétricas entre anos consecutivos, uma vez que proporciona produção equilibrada ao longo do horizonte de planejamento e menores riscos de oportunidade, além de resultar em distribuição espacial mais adequada em nível operacional e ambiental.

Ressalta-se, também, que a abordagem adotada no Cenário C, sem o acréscimo de restrições espaciais no problema e tendo como apoio um Sistema de Informações Geográficas, permite avaliar previamente a viabilidade dos resultados obtidos sem incluir restrições espaciais, o que oportuniza formulações matematicamente menos complexas e que possam se ajustar às exigências ambientais pretendidas.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTYNCZIK, A. L. D. **Planejamento florestal otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita**. 170p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 4, p. 649–656, 2015.
- BANHARA, J. R.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F.; MOREIRA, J. M. A. P.; SILVA, L. M. S. da S.; NOBRE, S. R.; COGSWELL, A. Optimized harvest scheduling in eucalyptus plantations under operational, spatial and climatic constraints. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 85, p. 85–95, 2010.
- BASKENT, E. Z.; JORDAN, G. A. Designing forest management to control spatial structure of landscapes. **Landscape and Urban Planning**, v. 34, n. 1, p. 55–74, 1996.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modelling**, v. 188, n. 2–4, p. 145–173, 2005.
- BATEMAN, T. S; SNELL, S. A. **Administração**. 2. ed. Série A - Porto Alegre, RS: AMGH, 2012. 408p.
- BETTINGER, P.; JOHNSON, K. N.; SESSIONS, J. Forest planning in an Oregon case study: Defining the problem and attempting to meet goals with a spatial-analysis technique. **Environmental Management**, v. 20, n. 4, p. 565–577, 1996.
- DIAZ-BALTEIRO, L et al. Economics and management of industrial forest plantations. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The Management of industrial forest plantations: theoretical foundations and applications**. Springer. 2014. p. 121-170.
- EMBRAPA. **Softwares para manejo florestal**. 2017. Available at: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/softwares-florestais>. Accessed in: 30 janeiro 2017.
- ESRI. **ArcGis desktop**: release 10.5. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2017.
- GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial**. 235p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Comparação entre meta-heurística simulated annealing e a programação linear inteira no agendamento da colheita com restrições de adjacência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 449–460, 2013.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. L. DA. Efeito das restrições espaciais de adjacência no planejamento florestal otimizado. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 3, p. 573–584, 2010.

IBÁ. Relatório 2016. **Relatório**. São Paulo. 2016.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMANN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives - discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 18, n. 1, p. 1-31, 1977.

KURTTILA, M. The spatial structure of forests in the optimization calculations of forest planning - A landscape ecological perspective. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 142, n. 1–3, p. 129–142, 2001.

LI, R.; BETTINGER, P.; BOSTON, K. Informed development of meta heuristics for spatial forest planning problems. **The open Operational Research Journal**, v. 4, p. 1–11, 2010.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3 ed. UFV, 2014. 543p.

MARQUES, A. S. et al. 2014. Tactical and operational harvest planning. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The management of industrial forest plantations: theoretical foundations and applications**. Springer. 2014. p. 239-267.

MCDILL, M. E.; REBAIN, S. A.; BRAZE, J. Harvest scheduling with area-based adjacency constraints. **Forest Science**, v. 48, n. 4, p. 631–642, 2002.

MCDILL, M. E. 2014. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The management of industrial forest plantations**. Springer. 2014. p. 27-59.

OPTIMBER OTIMIZAÇÃO E INFORMÁTICA LTDA. **Produtos**. 2017. Available at: <http://www.optimber.com.br/index.php/software/optimber-lp>. Accessed in: 30 janeiro 2017.

RODRIGUES, L.C.E. **Gerenciamento da produção florestal**. Documentos Florestais. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Ciências Florestais, 1991, v.13, p.1-41.

SILVA, P. H. B. M. et al. Forest harvest scheduling plan integrated to the road network. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 1, p. 69–76, 2016.

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.

VIELMA, J. P. et al. Improving computational capabilities for addressing volume constraints in forest harvest scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, v. 176, n. 2, p. 1246–1264, 2007.

YOSHIMOTO, A.; KONOSHIMA, M. Spatially constrained harvest scheduling for multiple harvests by exact formulation with common matrix algebra. **Journal of Forest Research**, v. 21, n. 1, p. 15–22, 2016.

5. PLANEJAMENTO TÁTICO DA COLHEITA FLORESTAL CONSIDERANDO DIFERENTES RESTRIÇÕES DE AGENDAMENTO

RESUMO

Este estudo foi realizado com o objetivo de analisar diferentes cenários de minimização de custos para o planejamento tático das atividades de colheita de uma empresa de celulose catarinense que atenda fatores econômicos e o abastecimento de sua planta. Os dados considerados são referentes a um povoamento de *Pinus* spp. de 3.714,68 hectares, com idades de 10 a 15 anos, sem desbaste e com ciclo de manejo de 15 anos. Para a elaboração dos cenários de otimização, os povoamentos foram divididos em 74 unidades de manejo em função de características de localidade e idade. Além de que, foram utilizadas informações de comercialização da madeira, das características dos produtos e do algoritmo de árvore geradora mínima para a definição das rotas de estradas. Foram considerados os sortimentos de celulose e serraria, que se diferenciaram quanto aos diâmetros e comprimentos das toras. O problema baseou-se em três cenários que buscaram minimizar custos, diferenciando-se nas restrições: Cenário K) equilíbrio de volume; Cenário L) limite de distância de agendamento; e, Cenário M) equilíbrio e limite de distância para seleção de áreas. A comparação dos resultados obtidos demonstrou que o modelo que minimizou custos e equilibrou o volume (Cenário K) obteve menor custo presente operacional, todavia, apresentou 49% (142 km) de rede de estradas a mais que o Cenário M. Em contrapartida, o Cenário L apresentou uma janela de risco muito mais elevada que em relação aos demais cenários. Logo, concluiu-se que o Cenário M resultou na melhor alternativa de remuneração e redução de risco, destacando-se a importância de se estruturar adequadamente um problema de gerenciamento, pois áreas relacionadas com a atividade alvo podem apresentar participação expressiva nos custos finais, aos quais podem influenciar na seleção das melhores soluções.

Palavras-chave: Minimização de custos; PLIM; Plano de produção.

ABSTRACT

This study was carried out with the objective of analyzing different cost minimization scenarios for the tactical planning of the harvesting activities of a Santa Catarina pulp company that meets economic factors and the supply of its plant. The data considered refer to a *Pinus* spp. of 3,714.68 hectares, with ages ranging from 10 to 15 years, without thinning and with a management cycle of 15 years. For the elaboration of optimization scenarios, the stands were divided into 74 management units based on locality and age characteristics. In addition, information on the commercialization of the wood, product characteristics and the minimum generating tree algorithm was used to define the road routes. The assortments of cellulose and sawmill were considered, which differed in the diameters and lengths of the logs. The problem was based on three scenarios that sought to minimize costs, differentiating in the restrictions: Scenario K) volume balance; Scenario L) scheduling distance limit; and, Scenario M) balance and distance limit for selection of areas. The comparison of the obtained results showed that the model that minimized costs and balanced the volume (Scenario K) obtained a lower operational cost, however, it presented 49% (142 km) of road network more than Scenario M. In contrast, the Scenario L presented a much higher risk window than in the other scenarios. Therefore, it was concluded that Scenario M resulted in the best alternative of remuneration and risk reduction, highlighting the importance of adequately structuring a management problem, since areas related to the target activity may present a significant share of final costs, which can influence the selection of the best solutions.

Keywords: Cost minimization; MILP; production plan.

5.1. INTRODUÇÃO

As operações tática e operacional são componentes chave na cadeia de abastecimento de madeira, uma vez que atuam com grande parte do custo total, tornando-as etapas críticas e que necessitam ser bem planejadas (MARQUES et al., 2014). O modelo tático traduz decisões para unidades espaciais menores, de modo a viabilizar o plano de operação, que considera decisões mais detalhadas de localização relativas a um menor período de planejamento (CHURCH, 2007).

A análise tática em colheita florestal está relacionada com a seleção e o sequenciamento de corte dos talhões ou blocos (D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011), que determinam quando, onde e quanto de madeira colher para satisfazer as demandas temporais de volume (BUONGIORNO; GILLES, 2003). Outro componente importante a ser abordado nessa etapa de planejamento, consiste na análise da rede rodoviária a ser utilizada, uma vez que a indústria depende de estradas eficientes para fornecer acesso às áreas de colheita (D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011). Um ligeiro aumento no custo de colheita, devido a mudança na localização do módulo de corte, pode resultar em redução significativa no custo de construção rodoviária (BORGES et al., 2014).

De acordo com a formulação do problema, é necessário resolvê-lo usando um método de solução apropriado. Todavia, formular um modelo que descreva uma condição real de maneira adequada e que possa ser resolvido dentro de limites práticos de tempo, torna-se um problema complexo. Operações florestais envolvem atividades limitadas pela correlação entre rendimento produtivo e econômico, custos logísticos e níveis de serviço (D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011), dificultando o processamento dos dados em virtude da elevada quantidade de iterações que devem ser feitas. A literatura florestal apresenta vários métodos de solução e ferramentas computadorizadas desenvolvidas para abordar problemas de sequenciamento otimizado de corte, como Bettinger et al. (2009), Smaltschinski et al. (2012), Marques et al. (2014) e Silva et al. (2016).

Após a resolução do modelo e a aprovação do plano, permite-se instaurar a base para a negociação de contratos de terceirização com eventuais empreiteiros de colheita, empresas de construção rodoviária, fornecedores de madeira e comerciantes (MARQUES et al., 2014), tendo em vista minimizar as incertezas e atingir os objetivos da empresa.

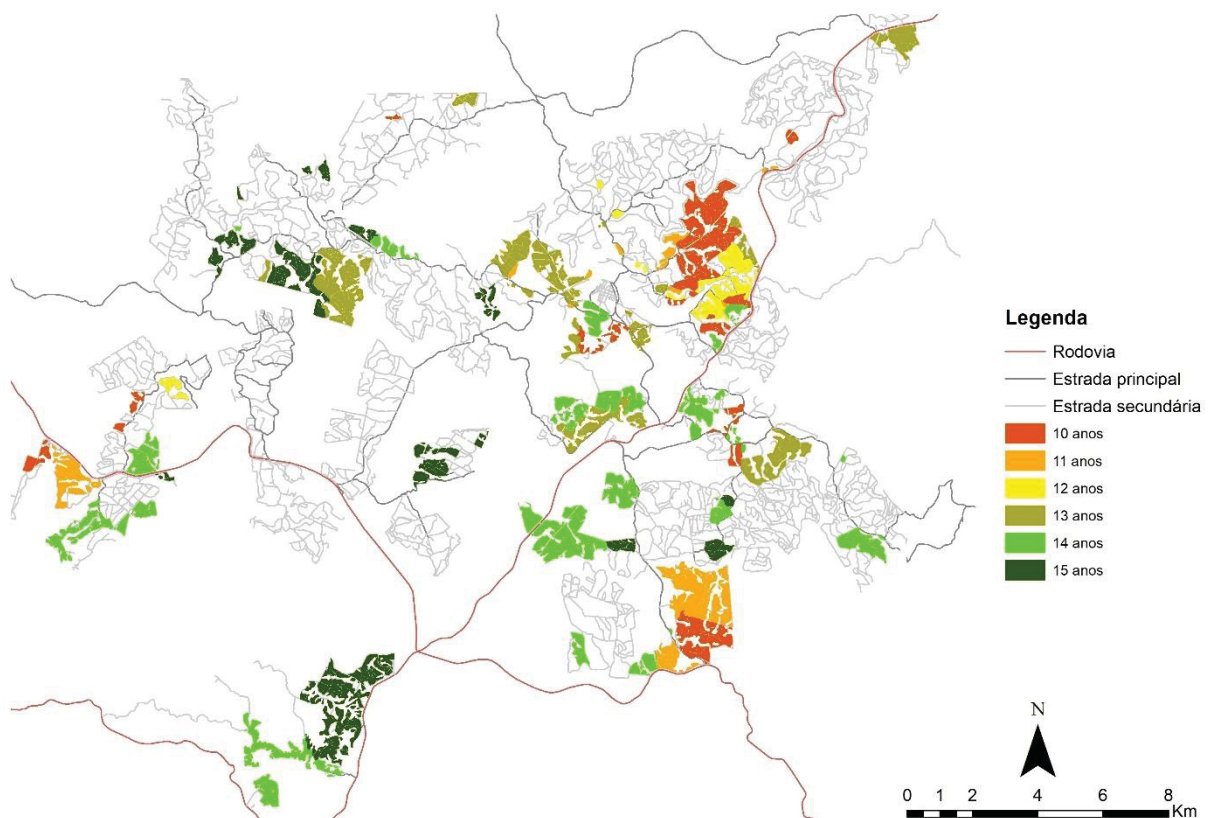
Dessa forma, objetivou-se neste estudo formular diferentes modelos de minimização de custo para o agendamento florestal tático das atividades de colheita de uma empresa de celulose do estado de Santa Catarina considerando a iteração entre as unidades de manejo e a distribuição das áreas tendo em vista atender fatores econômicos e de abastecimento da planta.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1. Área de estudo

Foram considerados neste estudo dados obtidos de uma fábrica de celulose, localizada no estado de Santa Catarina, Sul do Brasil, que destina a matéria-prima de suas florestas para o abastecimento de sua planta. A área total dos plantios considerados foi de 3.714,68 ha, com idades de 10 a 15 anos (FIGURA 7) e ciclo de manejo de 15 anos, sem desbaste. A base de dados foi dividida em 74 unidades de manejo, em função das características de localidade e idade.

FIGURA 7 - ESTRUTURA INICIAL DA FLORESTA POR FAIXA ETÁRIA.



FONTE: O autor (2018).

5.2.2. Parâmetros gerais

Foram considerados os sortimentos classificados como processo (8 a 28 cm de diâmetro da ponta fina e comprimento de 2,4 m) e serraria (acima de 28 cm com comprimento de 2,6 m) como padrões de processamento. O produto processo é destinado exclusivamente para o abastecimento da indústria enquanto que o sortimento serraria, quando existente, é remtido para venda no mercado. A venda do volume do produto serraria para o mercado da região complementa os ingressos, mas não estabelece prioridade no modelo de planejamento adotado, e sim, corresponde a um valor extra na maximização do resultado econômico do planejamento.

Assim sendo, a produção anual para abastecimento da indústria foi estabelecida em 337.500 toneladas de madeira de processo para o primeiro ano e 450.000 toneladas para os demais quatro anos pertencentes ao horizonte de planejamento, sendo considerado um fator de 0,95 para conversão de metro cúbico para tonelada. As estimativas de produção foram determinadas por meio do uso do *software* SisPinus® (EMBRAPA, 2017) acionado internamente pelo *software* OpTimber–LP (OPTIMBER, 2017).

Os valores correspondentes aos custos florestais foram obtidos por meio do somatório do custo de produção, custo de compra de madeira e custo de frete, os quais foram submetidos a uma taxa fixa de juros de 10% ao ano. Todos os preços e custos utilizados neste estudo correspondem aos valores praticados pela empresa no ano de 2016, os quais foram equivalentes a R\$ 20,78 e R\$ 25,70 por tonelada de madeira cortada em áreas planas (abaixo de 15% de declividade) e onduladas (acima de 15% de declividade), respectivamente. Os custos de frete posto em fábrica, que couberam apenas aos volumes de processo, variaram de acordo com a localidade de cada bloco. O valor de compra de madeira de processo do mercado foi relativo a R\$ 70,00 por tonelada, bem como o valor empregado aos volumes de venda de toras para serraria consistiu em R\$ 132,50 por tonelada.

5.2.3. Geração dos fluxos de rotas

A partir da solução do agendamento da colheita, gerada pelo programa OpTimber (OPTIMBER, 2017), aplicou-se o algoritmo da árvore geradora mínima

(*Spanning Tree*) no *software* LINGO (LINDO SYSTEMS INC., 2017), para a criação da matriz de caminhos mínimo referentes a cada período dos diferentes cenários testados. O algoritmo da árvore geradora mínima envolve a escolha de um conjunto de caminhos que possua o comprimento total mais curto, dada uma rede conectada, mas não direcionada a um destino especificado (CLARK; MELLER; MCDONALD, 2000).

5.2.4. Modelos matemáticos

O modelo matemático foi formulado com o objetivo de minimizar os custos envolvidos na colheita florestal, sujeitos às restrições de produção. Para a resolução do problema, foi aplicado um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), com base na formulação do modelo Tipo I (JOHNSON; SCHEURMANN, 1977), utilizando-se variáveis binárias para as variáveis decisórias do sequenciamento anual das operações de colheita. Em que: Z : Valor presente líquido global (R\$); I : Número total de estratos; B : Número total de blocos; J : Número total de regimes; K : Número total de anos do horizonte de planejamento; L : Número total de produtos florestais; S : Número total de destinos; R : Número de regiões; t : Taxa anual de juros; $Compra_{kls}$: Volume de compra (ton) de madeira de terceiros do produto l , no ano k , para o destino s ; PCM_{kls} : Custo (R\$/ton) de compra de madeira do produto l , no ano k , no destino s ; $YKLR_{klrs}$: Volume total (ton) de madeira do produto l , região r , destino s , no ano k ; $Frete_{rs}$: Custo do frete (R\$) referente a região r para o destino s ; CP_{ij} : Custo de produção (R\$/ha) no estrato i com regime j ; R_{ijk} : Receita presente (R\$/ha) obtida com a venda de madeira de serraria (diâmetro ponta fina de 28cm e com comprimento de 2,60 m) para terceiros referente ao estrato i , ano k , com regime j ; C_{ijk} : Custo presente (R\$/ha) obtido com a produção de madeira de todos os estratos i , no ano k , com regime j ; X_{ij} : Representa a área (ha) do povoamento no estrato i com regime j ; $DEMANDA_{ks}$: Demanda volumétrica (ton) em cada período do horizonte de planejamento k e destino s ; v_{ijkl} : Volume (ton/ha) potencial total existente no estrato i , do produto l , no ano k , com regime j ; $FTIKL_{kls}$: Fator de conversão m³ para toneladas; $MOKR_{kr}$: Produção total volumétrica (ton) em cada período do horizonte de planejamento k na região r ; $MAXVARMOKR_{kr}$: Percentual máximo (%) de variação

volumétrica em cada período do horizonte de planejamento k na região r ; $DISTBLK_{b1b2}$: Distância (km) entre os blocos $b1$ e $b2$; $BINDISTBLK_{b1b2k}$: Variável binária: 1, caso o trecho de estrada entre o par de blocos $b = 1$ e $b = 2$ seja usado no ano k ; 0, caso contrário; DM : Dispersão máxima entre unidades de manejo (23Km)³; $BINBLK_{b1k}$: Variável binária que assume valor 1 se o blocos $b1$ seja escolhido para fazer parte da solução no ano k , ou valor 0 caso contrário; $BINBLK_{b2k}$: Variável binária que assume valor 1 se o blocos $b2$ seja escolhido para fazer parte da solução no ano k , ou valor 0 caso contrário; $OCIOBLK_{bk}$: Representa a área (ha) de corte ociosa no bloco b , no ano k ; e, $AREACORTEBLK_{bk}$: Representa a área (ha) de corte no bloco b , no ano k .

Função objetivo:

$$\begin{aligned} Min Z = & \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S [(1+t)^{-k} Compr_{kls} PCM_{kls}] \\ & + \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S Frete_{rs} \sum_{r=1}^R \sum_{l=1}^L [(1+t)^{-k} YKLS_{klrs}] + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (CP_{ij} X_{ij}) \quad [1] \\ CP_{ij} = & \sum_{k=1}^K [((R_{ijk} - C_{ijk}) / (1+t)^{-k})] \end{aligned}$$

Sujeito a:

$$DEMANDA_{ks} = \sum_{l=1}^L FTIKLS_{kls} * \left(\sum_{r=1}^R YKLS_{klrs} + Compr_{kls} \right) \quad \forall k, s \quad [2]$$

$$\sum_{s=1}^S YKLS_{klrs} = \sum_{i \in r} \sum_{j \in i} (X_{ij} v_{ijkl})$$

$$\sum_{k=1}^K BINBLK_{bk} \leq 1 \quad \forall b \quad [3]$$

$$\sum_{i=1}^{i \in b} \sum_{j=1}^{j \in i} X_{ij} + OCIOBLK_{bk} = BINBLK_{bk} * AREACORTEBLK_{bk} \quad \forall b, \forall k \quad [4]$$

³ Valor abaixo de 23Km resultou em solução infactível do problema.

$$MOKR_{kr} < (1 + (MAXVARMOKR_{kr}/100)) * MOKR_{k-1r} \quad \forall k \geq 2, \forall r \quad [5]$$

$$\begin{aligned} DISTBLK_{b_1b_2} * BINDISTBLK_{b_1b_2k} &< DM & \forall k \geq 2, \forall b_1, \forall b_2, \forall b_2 \neq b_1 \\ BINBLK_{b_1k} * BINBLK_{b_2k} - BINDISTBLK_{b_1b_2k} &< 1 & \forall b_1, \forall b_2, \forall b_2 \neq b_1, \forall k \geq 2 \end{aligned} \quad [6]$$

$$BINBLK_{b_1k}, BINBLK_{b_2k}, BINBLK_{b_k}, BINDISTBLK_{b_1b_2k} \in \{0,1\} \quad \forall b, k \quad [7]$$

De acordo com o modelo de programação inteira mista, a minimização do valor presente global [1] foi sujeita à restrição [2] para garantir a obtenção do volume mínimo demandado para o abastecimento da indústria ao longo do horizonte de planejamento, bem como as condicionantes de singularidade [3], [4] e [7]. A restrição [5] representou a produção total volumétrica do período k-1, que pode variar até 10% do volume do período k, enquanto a restrição [6] limitou o agendamento entre unidades de produção de até 23 km de distância. Por fim, foram testados três cenários de minimização de custos sujeitos a diferentes restrições para o agendamento florestal tático das atividades de colheita (TABELA 3).

TABELA 3 - CENÁRIOS TESTADOS NO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO CONSIDERANDO A FUNÇÃO OBJETIVO DE MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS PRESENTES.

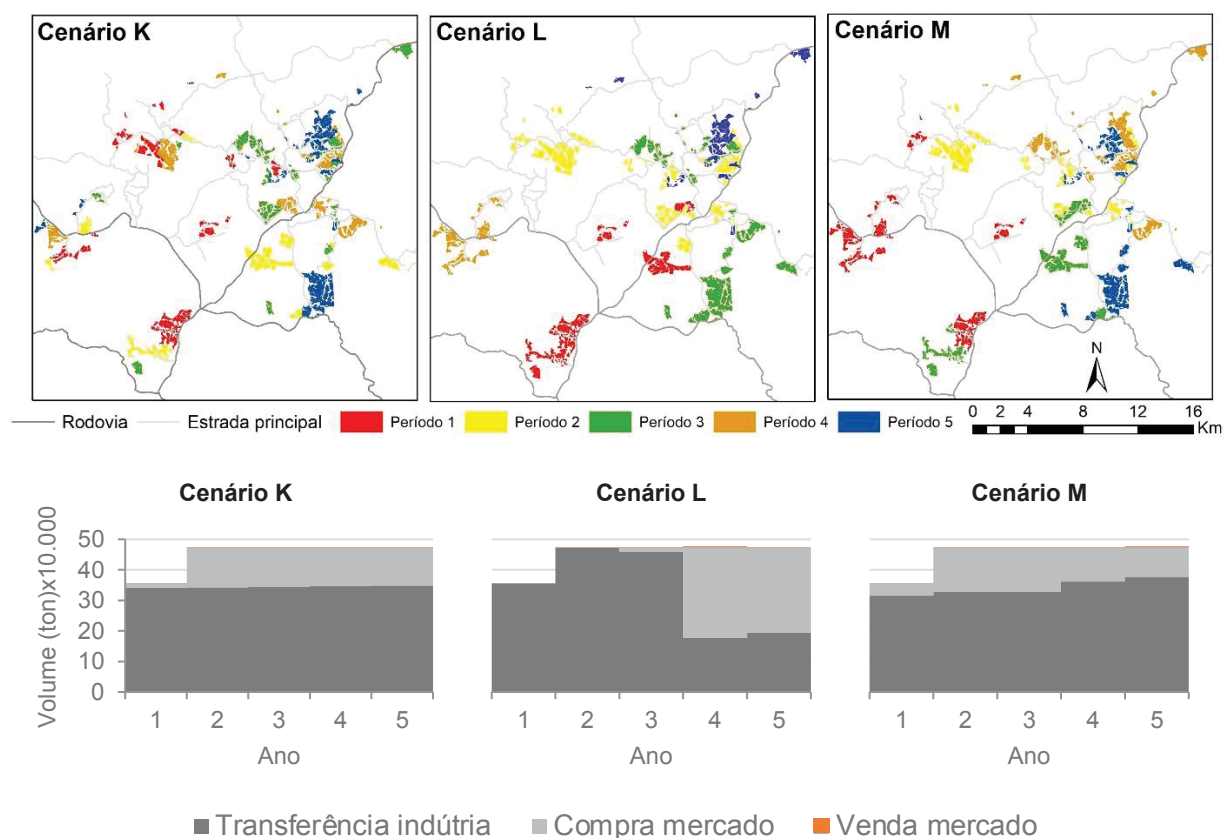
Cenário	Nome	Restrições
K	Equilíbrio de volume	2, 3, 4, 5, 7
L	Limite de distância de agendamento	2, 3, 4, 6, 7
M	Equilíbrio de volume + Limite de distância de agendamento	2, 3, 4, 5, 6, 7

FONTE: O autor (2018).

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos descritos foram testados em um computador com processador Intel® Core™ Duo CPU 2,93 GHz, 4Mb de memória RAM e resultaram em 36.263 variáveis de decisão, das quais 27.380 corresponderam a variáveis inteiras. A partir da solução dos modelos, pode-se observar (FIGURA 8) que, em alguns anos, houve necessidade de compra de madeira de processo do mercado, com vistas a suprir a demanda mínima requerida pela indústria. Adicionalmente, todos os cenários utilizaram a área total disponível para suprir a demanda de consumo ao longo do horizonte de planejamento.

FIGURA 8 - AGENDAMENTO TÁTICO DA COLHEITA FLORESTAL DOS CENÁRIOS K, L E M.

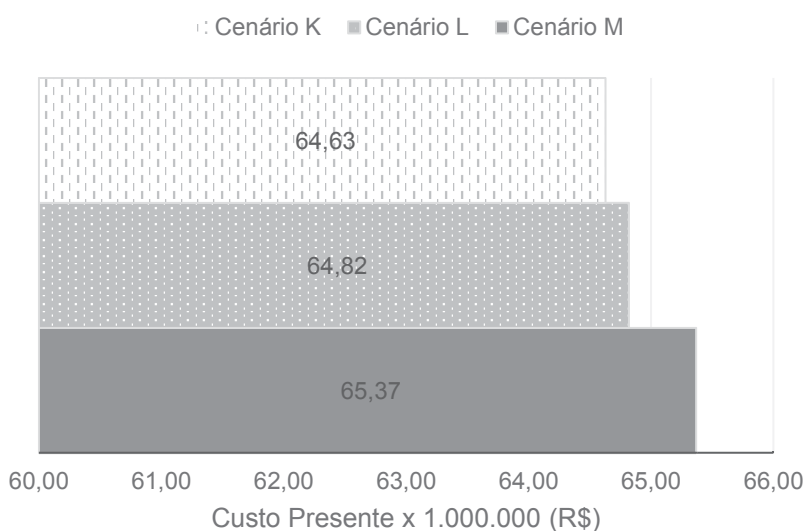


FONTE: O autor (2018).

Conforme os resultados apresentados na FIGURA 8, pode-se observar que no Cenário K, mesmo sujeito à restrição de equilíbrio de volume, foi agendado áreas de corte mais produtivas, sem se limitar com a localização dos blocos, conforme pode ser observado no período 1, por exemplo, em vermelho. Essa particularidade proporcionou a produção de maior volume de madeira de processo em relação aos

Cenário L e M, reduzindo a necessidade de compra de madeira do mercado. Como o somatório do custo de produção e frete correspondem, em média, a 55,6% a menos que o valor de compra, esse cenário resultou em um menor custo presente (FIGURA 9).

FIGURA 9 - CUSTO PRESENTE DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DE AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA DE *Pinus* spp.



FONTE: O autor (2018).

Em contrapartida, o Cenário L possui em sua formulação a condicionante de limitar o agendamento da colheita em um raio máximo de 23 km. Essa restrição possibilitou que o modelo concentrasse maior volume de corte no início do horizonte de planejamento. Essa característica oportuniza maior rendimento econômico em relação a taxa de juros utilizada, uma vez que os rendimentos dos primeiros períodos podem ser reinvestidos no mercado em melhores oportunidades de retorno (BUONGIORNO; GILLES, 2003).

No entanto, ainda que esse cenário disponha de maior flexibilidade para minimização de custo, obteve um valor presente, ligeiramente, mais caro que o Cenário K. Como o Cenário L foi capaz de concentrar maior quantidade de corte nos primeiros períodos, resultou em uma menor produtividade volumétrica total. Além de que, o modelo teve que limitar o agendamento de áreas que não infringissem a restrição de dispersão máxima entre unidades de colheita, o que corroborou com a obtenção de menor quantidade de madeira de processo, destacando a necessidade de compra de 12% de madeira a mais que o Cenário K.

Apesar disso, percebe-se também que, embora o Cenário L tenha resultado na maior necessidade de compra de madeira que o Cenário K, ele apresentou diferença de apenas 0,3% no custo presente. Essa situação se fundamenta quando se avalia a FIGURA 8, que mostra que no Cenário L, há necessidade de comprar maior quantidade de madeira nos dois últimos anos. Ou seja, a descapitalização do valor monetário do 4º e do 5º período tornam-se mais acentuadas do que quando se fragmentam os valores ao longo do HP, como ocorrem nos Cenário K e M.

No Cenário M, com a inclusão das restrições de equilíbrio de produção e limitação do raio de dispersão da colheita, gerou-se um modelo mais restritivo e com pouca flexibilidade nas atividades de agendamento. Assim, o Cenário M se ateve em selecionar as áreas que atendessem a limitação de dispersão, bem como em respeitar o equilíbrio do volume ao longo do planejamento - tolerando-se a variação de no máximo 10% a mais que o volume demandado -, resultando na obtenção de menor quantidade de madeira de processo que o Cenário K e, conseqüentemente, maior necessidade de volume de compra.

Apesar do Cenário M necessitar de apenas 2% de madeira de processo a mais que o Cenário K, diferentemente dos 12% de volume de compra entre os Cenários L e K, ele resultou na solução mais onerosa deste estudo (FIGURA 8). Isto também está relacionado com a descapitalização mencionada, pois no Cenário M houve maior necessidade de compra de volume de madeira, principalmente no início do horizonte de planejamento, diferentemente do Cenário L, que postergou a compra e limitou-se em apenas dois anos a necessidade mais acentuada de aquisição de madeira do mercado, obtendo-se custo presente inferior.

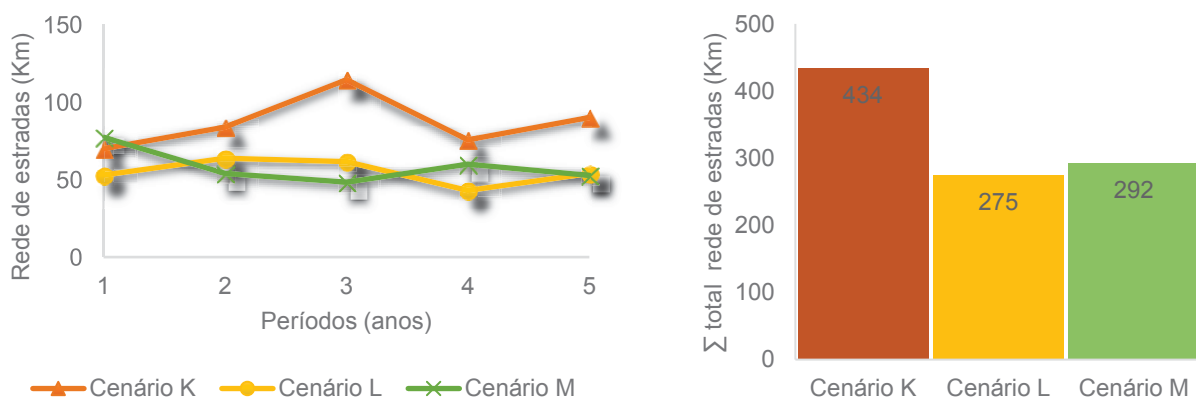
Embora o Cenário L tenha buscado maior liquidez, ele apresentou uma janela de risco mais elevada que os demais cenários, pois, de acordo com Augustynczyk et al. (2015), a produção descontinuada ao longo dos anos de planejamento possibilita deparar-se com custos de oportunidade e perdas econômicas por conta de interrupções no processo produtivo.

Não obstante, devido às variações de produção madeireira e custo entre os cenários que mantiveram a produção equilibrada (Cenário K e M), foram avaliadas as distâncias totais de estradas nos períodos avaliados, dada a grande importância das estradas em um problema da colheita florestal. Dado que o conjunto colheita florestal e estradas representam pelo menos 50% do custo florestal total (MACHADO, 2014),

influenciando na viabilidade dos planos de gestão (D'AMOURS; EPSTEIN; RÖNNQVIST, 2011).

Uma vez que o padrão de colheita foi estabelecido para cada cenário, pode-se observar nas FIGURAS 8 e 10 que o Cenário K, mesmo resultando em um menor custo presente, apresentou 49% (142 km) de rede de estradas a mais que no Cenário M. Como a indústria florestal é altamente dependente de uma rede rodoviária eficaz, a qual possibilita o acesso entre às áreas de colheita e o centro consumidor, torna-se fundamental combinar às decisões de colheita e investimentos rodoviários (MARQUES et al., 2014). Portanto, diante dos resultados apresentados, observa-se que o Cenário M resultou em um plano de colheita mais adequado em função do objetivo e do risco de oportunidade.

FIGURA 10 - SOMA PERIÓDICA DAS REDES DE ESTRADAS (Km) UTILIZADAS NOS DIFERENTES CENÁRIOS SIMULADOS.



FONTE: O autor (2018).

5.4. CONCLUSÕES

Os modelos apresentados podem ser adaptados por outras empresas florestais. Todavia, pode-se avaliar a importância de se estruturar adequadamente o problema de gerenciamento, pois, embora todos os cenários possuam o mesmo objetivo de minimizar custos, eles apresentam diferentes riscos de oportunidade de abastecimento para a empresa, além de fortes reflexos de custos associados à colheita florestal, como é o caso da rede de estradas. À vista disso, destaca-se a necessidade de considerar áreas relacionadas com a atividade alvo, em razão de que podem apresentar participação expressiva nos custos finais, sendo capaz de influenciar na seleção dos melhores cenários.

Por conseguinte, o Cenário M, que minimiza os custos e restringe a equalização do volume e a limitação da dispersão da colheita, demonstra a melhor alternativa de remuneração e de menor risco de oportunidade advinda do povoamento florestal.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTYNICZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 649–656, 2015.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest management and planning**. Nova Iorque: Academic Press, 2009.
- BORGES, J. G.; MARQUES, A. S.; ERIKSSON, L. O.; MAREY, M. F. Integrating management planning levels with decision support systems. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The management of industrial forest plantations: theoretical foundations and applications**. Springer, 2014. p. 299-320.
- BUONGIORNO, J.; GILLES, J. K. **Decision methods for forest resource management**. Academic Press, 2003.
- CHURCH, R. L. Tactical-level forest management models: bridging between strategic and operational problems. In: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJØRNDAL, T.; EPSTEIN, R. **Handbook of operations research in natural resources**. Springer US, 2007. p. 343-363.
- CLARK, M. M.; MELLER, R. D.; MCDONALD, T. P. A Three-stage heuristic for harvest scheduling with access road network development. **International Journal of Database Management Systems**, v. 6, n. 2, p. 39–47, 2000.
- D'AMOURS, S.; EPSTEIN, R.; RÖNNQVIST, M. Operations research in forestry and forest products industry. **Information systems and operational research**, v. 46, n. 4, p. 265–281, 2011.
- LINDO SYSTEMS INC. 2017. Available at: <<http://www.lindo.com/index.php/lis-downloads>>. Accessed in: 20 de julho 2017.
- MARQUES, A. S.; AUDY, J. F.; D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M. Tactical and operational harvest planning. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The management of industrial forest plantations: theoretical foundations and applications**. Springer, 2014. p. 239-267.
- OPTIMBER OTIMIZAÇÃO E INFORMÁTICA LTDA. Produtos. 2017. Available at: <http://www.optimber.com.br/index.php/software/optimber-lp>. Accessed in: 30 janeiro 2017.
- RODRIGUES, L.C.E. **Gerenciamento da produção florestal**. Documentos Florestais. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Ciências Florestais, 1991, v.13, p.1-41.
- RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical programming**, v. 97, n. 1–2, p. 267–284, 2003.

SILVA, P. H. B. M. da; ARCE, J. E.; LOCH, G. V.; DAVID, H. C.; FIORENTIN, L. D. Forest harvest scheduling plan integrated to the road network. **Cerne**, v. 22, n. 1, p. 69–76, 2016.

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.

VIELMA, J. P.; MURRAY, A. T; RYAN, D. M.; WEINTRAUB, A. Improving computational capabilities for addressing volume constraints in forest harvest scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, v. 176, n. 2, p. 1246–1264, 2007.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos cenários testados nesse trabalho, pode-se observar a importância de se estruturar adequadamente um problema de gerenciamento, observou-se a necessidade de se utilizar blocos de colheita para a minimização da dispersão das unidades amostrais e consequente redução de construção/manutenção de estradas. Constatou-se ainda, a necessidade de considerar a equalização do volume ao longo do horizonte de planejamento, que minimiza a exposição de riscos de preços, continuidade de mão-de-obra, infraestrutura e negociação de contratos com terceiros.

Como recomendações, sugere-se formular um modelo integrado entre colheita e estradas, cujo objetivo consista em comparar os valores obtidos com esse estudo.

Também ficam para trabalhos futuros a inserção de restrições de adjacência entre talhões, limitando-se o corte de acordo com a localização do talhão vizinho e/ou da área de corte do bloco.

REFERÊNCIAS

- ARCE J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando a minimização de custos**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- AUGUSTYNICZIK, A. L. D. **Planejamento florestal otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita**. 170p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- AUGUSTYNICZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 4, p. 649–656, 2015.
- BASKENT, E. Z.; JORDAN, G. A. Designing forest management to control spatial structure of landscapes. **Landscape and Urban Planning**, v. 34, n. 1, p. 55–74, 1996.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modelling**, v. 188, n. 2–4, p. 145–173, 2005.
- BATEMAN, T. S.; SNELL, S. A. **Administração**. 2. ed. Série A - Porto Alegre, RS: AMGH, 2012. 408p.
- BANHARA, J. R.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F.; MOREIRA, J. M. A. P.; SILVA, L. M. S. da S.; NOBRE, S. R.; COGSWELL, A. Optimized harvest scheduling in eucalyptus plantations under operational, spatial and climatic constraints. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 85, p. 85–95, 2010.
- BEAUDOIN, D.; FRAYRET, J.-M.; LEBEL, L. Hierarchical forest management with anticipation: an application to tactical–operational planning integration. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 38, n. 8, p. 2198–2211, 2008.
- BETTINGER, P.; JOHNSON, K. N.; SESSIONS, J. Forest planning in an Oregon case study: Defining the problem and attempting to meet goals with a spatial-analysis technique. **Environmental Management**, v. 20, n. 4, p. 565–577, 1996.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest management and planning**. Nova Iorque: Academic Press, 2009.
- BORGES, J. G.; MARQUES, A. S.; ERIKSSON, L. O.; MAREY, M. F. Integrating management planning levels with decision support systems. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The management of industrial forest plantations: theoretical foundations and applications**. Springer, 2014. p. 299–320.
- BOYLAND, M. **Hierarchical planning in forestry**. Vancouver: Department of Forest Science, The University of British Columbia. 2003.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, K. J. **Forest management and economics: a primer in quantitative methods**. New York: Collin Mcmillan, 1987. 284p.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. **Decision methods for forest resource management**. Academic Press, 2003.

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

CHURCH, R. Tactical-level forest management models. In: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJØRNDAL, T.; EPSTEIN, R. **Handbook of operations research in natural resources**. Springer, 2007. p. 342-363.

CLARK, M. M.; MELLER, R. D.; MCDONALD, T. P. A Three-stage heuristic for harvest scheduling with access road network development. **International Journal of Database Management Systems**, v. 6, n. 2, p. 39–47, 2000.

CLUTTER, J.L.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.

D'AMOURS, S.; EPSTEIN, R.; RÖNNQVIST, M. Operations Research in Forestry and Forest Products Industry. **Information systems and operational research**, v. 46, n. 4, p. 265–281, 2011.

DANTZIG, G. B.; THAPA, M. N. **Linear programming**. New York: Springer-Verlag New York, 1997.

DEMERS, C.; LONG, A.; CLAUSEN, R. What is in a natural resource management plan school of forest resources and Conservation, Florida Cooperative Extension Service, **Institute of food and agricultural sciences**, University of Florida, Gainesville, FL. Extension Report SS-FOR-14, 2001.

DIAZ-BALTEIRO, L et al. Economics and management of industrial forest plantations. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The Management of industrial forest plantations: theoretical foundations and applications**. Springer. 2014. p. 121-170.

DRUCKER, P. F. **O melhor de Peter Drucker a administração**. São Paulo: Nobel, 2001. Disponível em: <
https://books.google.com.br/books?id=CCORvXvPHJUC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 13 de set. de 2017.

EMBRAPA. **Softwares para manejo florestal**. 2017. Available at: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/softwares-florestais>. Accessed in: 30 janeiro 2017.

ESRI. **ArcGis desktop**: release 10.5. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2017.

GOLDBARG, M.C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial**. 235p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. DA. Comparação entre meta-heurística simulated annealing e a programação linear inteira no agendamento da colheita com restrições de adjacência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 449–460, 2013.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. L. DA. Efeito das restrições espaciais de adjacência no planejamento florestal otimizado. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 3, p. 573–584, 2010.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

IBÁ. Relatório 2014. **Relatório**. São Paulo. 2014.

IBÁ. Relatório 2016. **Relatório**. São Paulo. 2016.

IBÁ. Relatório 2017. **Relatório**. São Paulo. 2017.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMANN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives - discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 18, n. 1, p. 1-31, 1977.

KURTTILA, M. The spatial structure of forests in the optimization calculations of forest planning - A landscape ecological perspective. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 142, n. 1–3, p. 129–142, 2001.

LARNER, H. Forum: The origin of operational research. **Operations Research**, v. 32, n. 2, p. 465-476, 1984.

LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. da S.; MONTE, M. A.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A. Regulação da produção florestal. In: VALE, A. B. do.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. de P. **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa: SIF, 2013. P. 315-326.

LEUSCHNER, W. A. **Forest regulation, harvest scheduling, and planning techniques**. New York: Wiley, 1990. 281 p.

LI, R.; BETTINGER, P.; BOSTON, K. Informed Development of Meta Heuristics for Spatial Forest Planning Problems. **The open Operational Research Journal**, v. 4, p. 1–11, 2010.

LINDO SYSTEMS INC. 2017. Available at: <<http://www.lindo.com/index.php/lis-downloads>>. Accessed in: 20 de julho 2017.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Planejamento. In: MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. 3 ed. UFV, 2014. 543p.

MARQUES, A. S.; AUDY, J. F.; D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M. Tactical and operational harvest planning. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The Management of industrial forest plantations**. Springer, 2014. p.239-267.

MCDILL, M. E.; REBAIN, S. A.; BRAZE, J. Harvest scheduling with area-based adjacency constraints. **Forest Science**, v. 48, n. 4, p. 631–642, 2002.

MCDILL, M. E. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. **The management of industrial forest plantations**. Springer, 2014. p. 27-59.

MITCHELL, S. A. **Operational forestry harvest scheduling optimization – A mathematical model and solution strategy**. 252f. Thesis - University of Auckland, Auckland, 2004.

ÖHMAN, K. **Forest planning with consideration to spatial relationships**. 32 f. Thesis - Department of Forest Resource Management and Geomatics, Swedish University of Agricultural Sciences, 2001.

OPTIMBER OTIMIZAÇÃO E INFORMÁTICA LTDA. **Produtos**. 2017. Available at: <http://www.optimber.com.br/index.php/software/optimber-lp>. Accessed in: 30 janeiro 2017.

RODRIGUES, L.C.E. **Gerenciamento da produção florestal**. Documentos Florestais. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Ciências Florestais, 1991, v.13, p.1-41.

RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical Programming**, v. 97, n. 1–2, p. 267–284, 2003.

SCHNEIDER, P.R. **Manejo florestal: Planejamento da produção florestal**. Santa Maria: CEPEF/FATEC/UFSM. 2009. 613p.

SILVA, P. H. B. M. et al. Forest harvest scheduling plan integrated to the road network. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 1, p. 69–76, 2016.

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.

VIELMA, J. P. et al. Improving computational capabilities for addressing volume constraints in forest harvest scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, v. 176, n. 2, p. 1246–1264, 2007.

YOSHIMOTO, A.; KONOSHIMA, M. Spatially constrained harvest scheduling for multiple harvests by exact formulation with common matrix algebra. **Journal of Forest Research**, v. 21, n. 1, p. 15–22, 2016.