

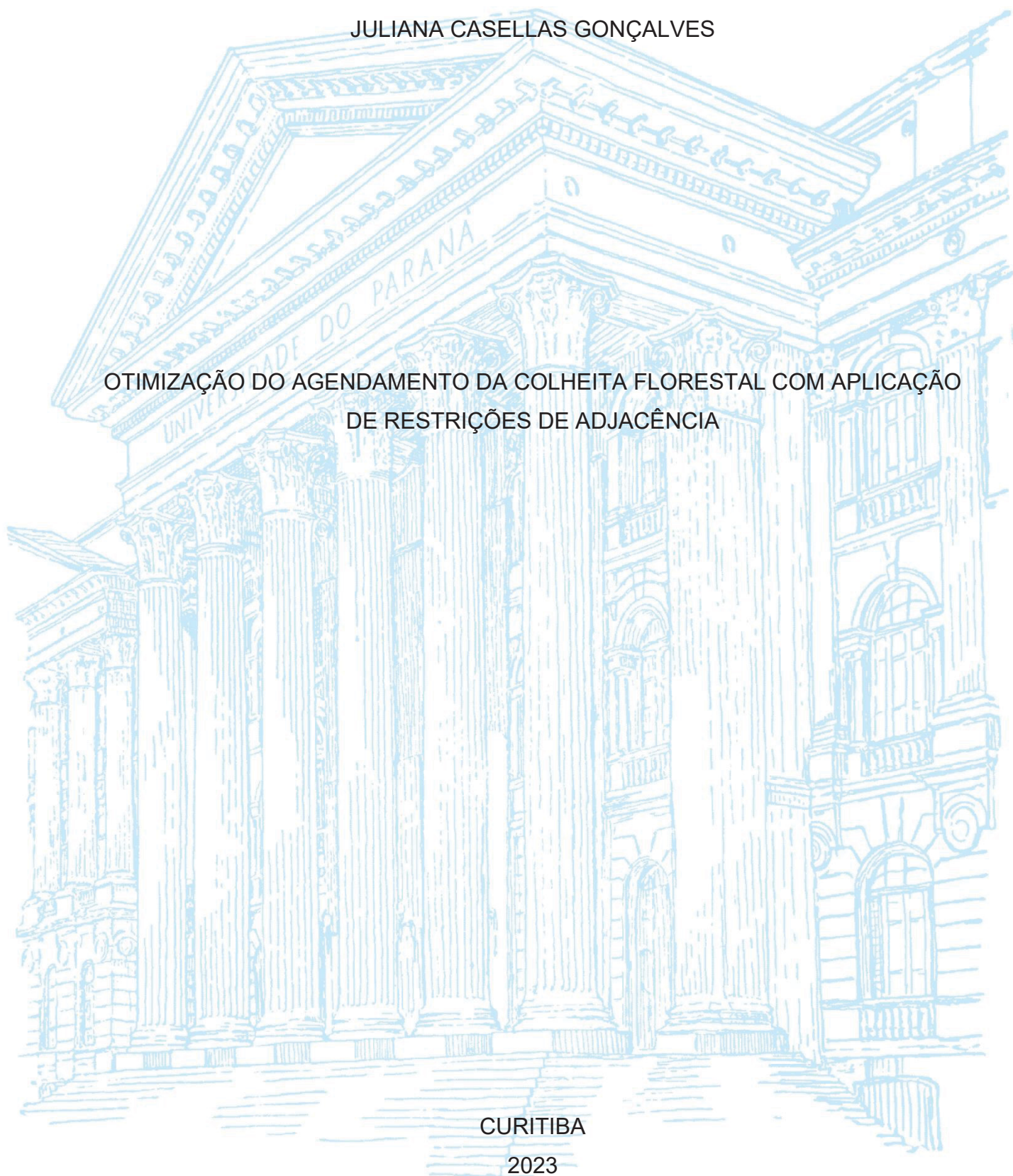
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIANA CASELLAS GONÇALVES

OTIMIZAÇÃO DO AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL COM APLICAÇÃO
DE RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA

CURITIBA

2023



JULIANA CASELLAS GONÇALVES

OTIMIZAÇÃO DO AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL COM APLICAÇÃO
DE RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Métodos Numéricos em Engenharia, área de concentração em Programação Matemática, no curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Área de Concentração em Programação Matemática, Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Gonçalves, Juliana Casellas.

Otimização do agendamento da colheita florestal com aplicação de restrições de adjacência. / Juliana Casellas Gonçalves. – Curitiba, 2023.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin.

1. Modelos matemáticos. 2. Aspectos econômicos. 3. Planejamento florestal. 4. Indústria florestal. I. Scarpin, Cassius Tadeu. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. III. Título.

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Júnior CRB-9/1797



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MÉTODOS NUMÉRICOS
EM ENGENHARIA - 40001016030P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **JULIANA CASELLAS GONÇALVES** intitulada: **OTIMIZAÇÃO DO AGENDAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL COM APLICAÇÃO DE RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA**, sob orientação do Prof. Dr. CASSIUS TADEU SCARPIN, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

Curitiba, 16 de Fevereiro de 2023.

Assinatura Eletrônica
23/02/2023 09:16:54.0
CASSIUS TADEU SCARPIN
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
28/02/2023 17:05:19.0
JOSÉ EDUARDO PÉCORA JUNIOR
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
23/02/2023 09:47:51.0
EDUARDO ALVES PORTELA SANTOS
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
24/02/2023 09:33:02.0
JULIO EDUARDO ARCE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Janete e Daniel pela paciência e compreensão e, em especial, à minha “segunda mãe” Nice pelo incentivo incondicional e suporte nos momentos difíceis. À minha avó Amália (*in memoriam*), que sempre me apoiou em todas as minhas decisões e me incentivou aos estudos.

Ao meu orientador Prof. Cassius Tadeu Scarpin por todo o apoio, paciência e ensinamentos ao longo do mestrado.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE) pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo suporte financeiro.

Aos professores do PPGMNE que contribuíram com a minha aprendizagem e aos colegas da pós graduação que participaram da trajetória de realização do Mestrado.

Aos professores da banca examinadora pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições ao presente estudo.

À Renata Correa pela disponibilização dos dados.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A indústria florestal possui grande relevância em muitos países devido a sua abrangência de utilização em diversas áreas. Por conta da diversidade e complexidade das atividades desenvolvidas no setor florestal, a tomada de decisão adequada é fundamental em todos os níveis de planejamento. O planejamento florestal é dividido hierarquicamente em três diferentes níveis: estratégico, tático e operacional. Dentro das etapas de planejamento está o manejo florestal, que inclui as decisões de planejamento da colheita com objetivo de atender a demanda industrial. A otimização do planejamento florestal pode ser feita utilizando modelos matemáticos, que geralmente são formulados por meio da programação linear inteira mista (PLIM). Neste estudo, foi abordado o problema de agendamento da colheita florestal com a aplicação de restrições espaciais de adjacência, buscando conciliar objetivos considerados conflitantes: econômicos e ambientais. O presente trabalho teve como objetivo a incorporação as restrições adjacência no modelo matemático, apresentando uma comparação entre o agendamento da colheita florestal tradicional com o planejamento espacial. No agendamento tradicional são considerados apenas os aspectos econômicos com restrições clássicas encontradas na literatura, tais como a garantia de que um talhão seja agendado para corte em um único período do horizonte de planejamento e equilíbrio na variação da produção volumétrica de madeira. Já no planejamento espacial, também são considerados aspectos ambientais, adicionando ao modelo restrições de adjacência de talhões por meio da aplicação de duas abordagens: Unit Restriction Model (URM) e Area Restriction Model (ARM). A abordagem URM impede que talhões adjacentes sejam colhidos no mesmo período do horizonte de planejamento. O modelo ARM permite a colheita de talhões adjacentes no mesmo período, desde que não ultrapasse a área máxima determinada, gerando blocos de colheita. Com relação ao modelo ARM foram feitos testes comparando duas formulações presentes na literatura, *Path* e *Bucket*, que possuem diferenças na quantidade de variáveis e/ou restrições do modelo matemático. Além de verificar o impacto da aplicação de restrições de adjacência sobre a função objetivo de maximização do Valor Presente Líquido (VPL) da floresta, também foram analisados os efeitos em relação ao volume de madeira produzido durante o horizonte de planejamento e a configuração espacial dos talhões selecionados para corte em cada um dos cenários testados. Os cenários sem restrições de área proporcionaram maior VPL e demandaram menor tempo computacional. Com a aplicação de restrições de adjacência, foi verificado que as restrições ARM causam menores reduções no VPL obtido em relação ao cenário livre do que a abordagem URM, sendo de até 0,23% na formulação *Path* e de 0,34% para a *Bucket*.

Palavras-chave: Agendamento da Colheita Florestal. Planejamento Tático Florestal. Planejamento Florestal Espacial. Programação Linear Inteira Mista.

ABSTRACT

Forestry industry has great relevance in many countries due to its scope of use in several areas. Due to the diversity and complexity of activities developed in the forestry sector, adequate decision-making is essential at all planning levels. Forest planning is hierarchically divided into three different levels: strategic, tactical and operational. Within tactical planning there is forest management, which includes harvest planning decisions, in order to satisfy industrial demand. Forest planning optimization can be done using mathematical models, which are generally formulated using Mixed Integer Linear Programming (MILP). In this study, forest harvest scheduling problem was approached with the application of spatial adjacency constraints, seeking to reconcile conflicting objectives: economic and environmental. This work aimed to incorporate spatial adjacency constraints in the mathematical model, presenting a comparison between the traditional forest harvesting scheduling with the spatial planning approaches. In the traditional harvest scheduling, only the economic aspects are considered, with classical constraints found in the literature, such as the guarantee that a stand is scheduled for harvest in a single period of the planning horizon only and balance of volumetric wood production variation. In spatial planning, environmental aspects are also considered, adding spatial adjacency constraints to the model, through the application of two approaches: Unit Restriction Model (URM) and Area Restriction Model (ARM). The URM approach prevents adjacent stands from being harvested in the same period of the planning horizon, whereas the ARM model allows adjacent stands harvesting in the same period, as long as it does not exceed the maximum determined area, generating harvest blocks. Regarding the ARM model, tests were performed comparing two formulations present in the literature, *Path* and *Bucket*, with differences in the number of variables and/or constraints of the mathematical model. In addition to verifying the impact of the application of spatial adjacency constraints on the objective function that maximizes the Net Present Value (NPV) of the forest, the effects in the volume of wood production during the planning horizon and the spatial configuration of the stands were also analyzed in the tested scenarios. Scenarios without area constraints provided higher NPV and required less computational time. With the application of adjacency constraints, results showed that the ARM constraints cause smaller reductions in the NPV compared to the free scenario than the URM approach, being up to 0.23% using *Path* formulation and 0.34% for *Bucket* formulation.

Keywords: Forest Harvest Scheduling. Tactical Forest Planning. Spatial Forest Planning. Mixed Integer Linear Programming.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FASES DO PLANEJAMENTO FLORESTAL	28
FIGURA 2 – EXEMPLO DE SOLUÇÃO FACTÍVEL DA ABORDAGEM URM.....	35
FIGURA 3 – EXEMPLO DE SOLUÇÃO FACTÍVEL DA ABORDAGEM ARM COM ÁREA MÁXIMA DE 20 HA	36
FIGURA 4 – EXEMPLO DE FLORESTA REPRESENTADA COMO UM GRAFO	38
FIGURA 5 – DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE IDADE DOS TALHÕES.....	42
FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL POR IDADE DOS TALHÕES	42
FIGURA 7 – PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA ANUAL NOS CENÁRIOS LIVRE E URM COM E SEM RESTRIÇÕES DE EQUILÍBRIO	66
FIGURA 8 – PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA ANUAL DA ABORDAGEM ARM PATH (40 E 50 HA)	67
FIGURA 9 – CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DOS TALHÕES SELECIONADOS PARA COLHEITA NOS CENÁRIOS LIVRE E URM	69
FIGURA 10 – AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA NOS CENÁRIOS COM APLICAÇÃO DA ABORDAGEM ARM PATH (40 E 50 HA)	70
FIGURA 11 – AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA NOS CENÁRIOS COM APLICAÇÃO DA ABORDAGEM ARM PATH (100 HA).....	71
FIGURA 12 – VOLUME ANUAL DE COLHEITA PARA OS CENÁRIOS ARM BUCKET (100 E 200 HA).....	75
FIGURA 13 – RESULTADOS DO CENÁRIO 16 (ARM BUCKET)	76
FIGURA 14 – RESULTADOS DO CENÁRIO 17 (ARM BUCKET)	77
FIGURA 15 – RESULTADOS DO CENÁRIO 18 (ARM BUCKET)	78
FIGURA 16 – CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DOS TALHÕES NO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DE ADJACÊNCIA SEM RESTRIÇÕES NA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA.....	83
FIGURA 17 – ESPACIALIZAÇÃO DOS TALHÕES SELECIONADOS PARA COLHEITA COM VARIAÇÃO DE 15% NO VOLUME ANUAL PRODUZIDO.....	84
FIGURA 18 – CONFIGURAÇÃO DOS TALHÕES SELECIONADOS PARA COLHEITA COM VARIAÇÃO DE 10% NO VOLUME ANUAL PRODUZIDO.....	85

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO PATH.....	39
QUADRO 2 – COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS TESTADOS EM RELAÇÃO AO CENÁRIO LIVRE	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR, BINÁRIA E INTEIRA E SUAS EXTENSÕES	26
TABELA 2 – ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NOS NÍVEIS DE DECISÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTO FLORESTAL	29
TABELA 3 – ESTRUTURA DA FLORESTA DESTINADA AO PLANEJAMENTO DA COLHEITA	41
TABELA 4 – ADJACÊNCIAS POR TALHÃO.....	43
TABELA 5 – SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO MATEMÁTICO	44
TABELA 6 – SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO MATEMÁTICO	52
TABELA 7 – CENÁRIOS TESTADOS PARA O MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DO VPL	57
TABELA 8 – CENÁRIOS ARM BUCKET	59
TABELA 9 – VALORES UTILIZADOS COMO PARÂMETRO PARA DEMANDA VARIÁVEL E CONSTANTE	61
TABELA 10 – CENÁRIOS TESTADOS PARA O MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DE ADJACÊNCIAS	62
TABELA 11 – RESULTADOS DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA OS CENÁRIOS LIVRE, URM E ARM PATH.....	63
TABELA 12 – RESULTADOS DOS CENÁRIOS ARM 40 UTILIZANDO O ALGORITMO PATH.....	64
TABELA 13 – VOLUME TOTAL DA COLHEITA NAS ABORDAGENS URM E ARM PATH E COMPARAÇÃO EM RELAÇÃO AO CENÁRIO LIVRE	65
TABELA 14 – PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA DE MADEIRA COM A APLICAÇÃO DA ABORDAGEM ARM PATH	68
TABELA 15 – RESULTADOS ARM BUCKET	73
TABELA 16 – VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DO VPL E VOLUME PRODUZIDO DO MODELO ARM BUCKET EM RELAÇÃO AO CENÁRIO LIVRE..	79
TABELA 17 – RESULTADOS DO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DE ADJACÊNCIAS	81

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ARM	- <i>Area Restriction Model</i>
ARMSC	- <i>Area Restriction with Stand-Clear-Cut Variables</i>
FO	- Função Objetivo
HP	- Horizonte de Planejamento
GMU	- <i>Generalized Management Units</i>
PL	- Programação Linear
PLIM	- Programação Linear Inteira Mista
PO	- Pesquisa Operacional
URM	- <i>Unit Restriction Model</i>
VPL	- Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	18
1.3 CONTRIBUIÇÕES	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	20
3 REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1 TRABALHOS CORRELATOS	23
3.2 PESQUISA OPERACIONAL	24
3.2.1 Programação Linear	25
3.3 PLANEJAMENTO FLORESTAL.....	27
3.3.1 Planejamento Estratégico.....	30
3.3.2 Planejamento Tático.....	31
3.3.3 Planejamento Operacional	31
3.4 PLANEJAMENTO FLORESTAL ESPACIAL	33
3.4.1 Restrições de Adjacência	33
3.4.2 Unit Restriction Model (URM).....	36
3.4.3 Area Restriction Model (ARM).....	37
4 MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	41
4.2 MODELO MATEMÁTICO	44
4.2.1 Maximização do VPL.....	44
4.2.2 Maximização de adjacências entre pares de talhões	51
5 TESTES COMPUTACIONAIS	56
5.1 GERAÇÃO DE CENÁRIOS DO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DO VPL	56
5.2 GERAÇÃO DE CENÁRIOS DO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DE ADJACÊNCIAS ENTRE PARES DE TALHÕES	61
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
6.1 RESULTADOS DO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DO VPL	63

6.2 RESULTADOS DO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DE ADJACÊNCIAS ENTRE PARES DE TALHÕES	81
7 CONCLUSÕES	86
7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS.....	91
ANEXO I – LISTA DE TALHÕES	94
ANEXO II – LISTA DE ADJACÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

Os problemas de planejamento na silvicultura vão desde o uso da terra, regeneração, construção de estradas, colheita, transporte, até a produção em serrarias, fábricas de celulose e de papel (RÖNNQVIST *et al.* 2015). Portanto, no setor florestal, a tomada de decisão adequada é fundamental em todos os níveis de planejamento, considerando questões sociais e ambientais, assim como restrições e objetivos da empresa florestal. É necessário levar em conta o tempo de processos de produção e logística florestal, com o objetivo de realizar o planejamento das ações de forma mais assertiva possível ao longo do horizonte de planejamento determinado.

De acordo com Rönnqvist (2003), a indústria florestal é muito importante na perspectiva regional e nacional em muitos países, pois as florestas fornecem uma grande variedade de produtos como papel, embalagens, materiais de construção e móveis, que representam uma grande parte da exportação em vários países. Por outro lado, se tratando de recursos naturais, também é preciso considerar fatores como recreação, habitat da vida selvagem, água limpa e armazenamento de carbono.

Conforme França *et al.* (2022), apesar de causar consequências negativas no ambiente, a indústria florestal gera impactos positivos na economia de vários países e, também, no aspecto social. O setor florestal global empregou diretamente mais de 18,21 milhões de pessoas e, indiretamente, gerou mais de 45,15 milhões de empregos (LI *et al.*, 2019).

O planejamento florestal é dividido hierarquicamente em planejamento estratégico, tático e florestal. Dentro da etapa do planejamento tático, temos o problema de planejamento de colheita florestal, que é considerado uma das principais fases da produção florestal. Um aspecto importante desse problema é a inclusão de restrições espaciais, que aumentam significativamente a dificuldade de encontrar uma solução para o problema de agendamento de corte florestal.

O presente estudo aborda o problema de agendamento de colheita florestal, em nível tático, com a aplicação de restrições espaciais de adjacência, a fim de conciliar dois aspectos considerados conflitantes: econômico e ambiental.

As questões econômicas contemplam os interesses da empresa florestal, tais como a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) da floresta e a diminuição de custos operacionais. Por outro lado, os aspectos ambientais referem-se aos diversos danos ambientais causados pela atividade de colheita. Para avaliar esses impactos,

Randall e Sassaman (1979) dividem o ecossistema em cinco subsistemas: água, solo, fauna, ar e vegetação. Esses subsistemas são essenciais para produção, mas todos são afetados negativamente pelas atividades de manejo florestal. Para diminuir os danos no ambiente causados pela colheita florestal, uma alternativa é a incorporação de restrições espaciais de adjacência.

Desta forma, o modelo matemático proposto tem como objetivo maximizar o VPL da floresta durante o Horizonte de Planejamento (HP). O HP consiste no tempo, subdividido em períodos, onde certas metas e restrições são consideradas. Será analisado o efeito da aplicação de restrições de adjacência sobre a produção volumétrica durante o horizonte de planejamento e a configuração espacial dos talhões selecionados para corte.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Aplicar um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista para o problema de agendamento de colheita florestal, com o objetivo de conciliar questões econômicas e ambientais.

1.1.2 Objetivos específicos

Incorporar restrições de adjacência no modelo matemático para otimização do agendamento da colheita florestal.

Testar e analisar duas abordagens do planejamento florestal espacial presentes na literatura

Apresentar um modelo matemático que considere aspectos econômicos e ambientais por meio das restrições aplicadas.

Analisar os resultados obtidos em duas diferentes abordagens do planejamento espacial ARM e URM por meio do VPL obtido, do volume colhido e da configuração espacial dos talhões agendados para a colheita no mesmo período.

Comparar os resultados obtidos na aplicação do modelo tradicional e do modelo que considera restrições espaciais de adjacência entre talhões e seus impactos na função objetivo e produção volumétrica de madeira.

Com relação a abordagem ARM, comparar os resultados obtidos na aplicação de duas formulações para a formação dos blocos de colheita, *Path* e *Bucket*.

Identificar o impacto da aplicação da função objetivo de maximização do VPL e de maximização de adjacências entre pares de talhões e seus impactos no VPL obtido e na espacialização dos talhões selecionados para corte.

1.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Os modelos matemáticos apresentados neste estudo são adequados a realidade por conciliar aspectos econômicos e ambientais, porém existe a limitação da validação do modelo por meio de sua aplicação com a utilização de dados de florestas reais. Visto que a maioria das florestas brasileiras são particulares e as empresas prezam pela confidencialidade, torna-se difícil a obtenção de dados para publicação em trabalhos acadêmicos.

Além disso, existe a limitação por conta da complexidade do modelo matemático que aumenta conforme o tamanho da floresta analisada, quanto maior a floresta, maior o número de restrições e variáveis, demandando mais tempo computacional para solução. Uma possível solução seria a utilização de métodos heurísticos, no capítulo 7 são apresentadas algumas sugestões para futuros trabalhos com a utilização de dados de florestas reais.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

As restrições de adjacência apresentadas são uma alternativa para o agendamento de colheita florestal de modo que atenda aspectos econômicos e ambientais simultaneamente: promovendo a agregação de áreas de colheita, favorecendo a empresa florestal com a maximização do VPL da floresta e a diminuição de custos operacionais e, ao mesmo tempo, ocasionando a diminuição dos efeitos ambientais tais como: desmatamento de áreas vastas, diminuição de fauna e impactos ao solo florestal causados pelo maquinário.

No presente estudo, além de trabalhar com cenários utilizando a FO de maximização do VPL da floresta, também foram propostos cenários onde esta é substituída pela FO de maximização de adjacências entre pares de talhões, favorecendo a agregação de talhões e ao mesmo tempo aplicando restrições de área

para satisfazer aspectos ambientais, onde o VPL desejado pela empresa florestal torna-se um parâmetro no modelo matemático. Desta forma, pode-se reduzir custos de construção e manutenção de estradas florestais.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo está organizado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta a delimitação do problema abordado na dissertação e suas principais características.

No capítulo 3 é apresentada a revisão de literatura, que contém conceitos iniciais sobre Pesquisa Operacional e trabalhos correlatos sobre planejamento florestal. Também, apresenta-se o problema de agendamento da colheita florestal e as restrições espaciais de adjacência que ajudarão no entendimento do problema abordado no desenvolvimento do estudo.

O capítulo 4 consiste na descrição dos modelos matemáticos aplicados e da área de floresta utilizada no estudo.

No capítulo 5 apresenta-se os testes computacionais e a geração de instâncias. O capítulo 6 abrange a discussão sobre os resultados obtidos na aplicação do modelo matemático para o problema de agendamento da colheita florestal considerando diferentes cenários.

Por fim, as conclusões da pesquisa e sugestões para futuros estudos são apresentadas no capítulo 7.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema abordado neste estudo será o agendamento de colheita florestal, considerando a aplicação de restrições de adjacência, com o objetivo de considerar aspectos financeiros e ambientais.

Segundo Augustynczik (2014), o problema de agendamento da colheita tradicional tem como objetivo encontrar a forma mais eficiente do ponto de vista econômico para colher um mosaico de talhões distribuídos pela floresta. O termo talhão é definido por McDill (2014) como uma parte da floresta onde os regimes de silvicultura são aplicados. Os talhões são compostos de unidades com mesma idade, da mesma espécie. Já o termo unidade de manejo é frequentemente utilizado com referência a grupos de talhões compostos por diferentes espécies que são manejadas coletivamente com idades variadas.

Marques *et al.* (2014) descreve o problema de planejamento tático de colheita florestal como a determinação de onde e quanto deve ser colhido em cada período do horizonte de planejamento. Para tal, deve-se levar em consideração a lista de áreas disponibilizadas para colheita no plano florestal estratégico, as estimativas de produção de madeira e os níveis de demanda estabelecidos pelas fábricas. O problema consiste em estabelecer o melhor período de colheita para cada um dos talhões da floresta, sendo modelado frequentemente por meio de Programação Inteira ou por formulações de Programação Inteira Mista. Estes modelos utilizam, essencialmente, variáveis de decisão binárias que assumem o valor 1, se o talhão for colhido no período e zero, caso contrário. Segundo os mesmos autores, as decisões relacionadas com o agendamento da colheita florestal em nível tático dependem de uma série de fatores que geram novas variáveis de decisão e restrições. Algumas delas são: o atendimento dos níveis de demanda de madeira pelas fábricas, a sazonalidade, a disponibilidade de recursos florestais, as melhores práticas de silvicultura das empresas e regulamentações nacionais.

Para Gomide *et al.* (2010), a otimização do agendamento de colheita contempla uma série de restrições vinculadas à distância de deslocamento de veículos, custos de transporte e metas da empresa florestal.

De acordo com Marques *et al.* (2014), um dos problemas no planejamento da colheita florestal, tanto em nível tático quanto operacional, é a sua elaboração, principalmente por meio de modelos determinísticos Mesmo com a existência de

métodos para prever volumes disponíveis na área de colheita, há um alto grau de incerteza quanto: as variações de volume de madeira disponível nos talhões, tempos de colheita de diferentes sistemas de máquinas, condições climáticas, entre outros. Outra questão é que problemas muito grandes, como de casos industriais, são mais complexos, demandando muito tempo computacional para encontrar uma solução próxima da ótima. Embora se tenha tido uma grande evolução da capacidade computacional de processamento de modelos matemáticos exatos de Programação Linear, não é raro encontrar problemas com milhões ou dezenas de milhões de variáveis e restrições, acrescentando ainda mais a complexidade ao abordar este problema dessa forma.

Apesar de determinar que os talhões sejam colhidos no máximo uma vez durante o horizonte de planejamento, no agendamento tradicional não há o controle da dispersão da colheita, podendo causar erosão do solo e devastação na área florestal. Para amenizar esses possíveis efeitos negativos, pode-se adicionar ao modelo restrições de adjacência, a fim de excluir combinações de atividades indesejáveis em talhões adjacentes. Neste estudo, o conceito de adjacência adotado determina que dois talhões são adjacentes se possuem uma fronteira em comum, de acordo com a definição apresentada em Constantino, Martins e Borges (2008).

Com as restrições de adjacências, pode-se evitar que grandes áreas sejam devastadas mantendo assim um certo equilíbrio ambiental observando nesta região uma paisagem em mosaico (AUGUSTYNCZIK, 2014). Esse tipo de restrição demanda o uso de variáveis binárias no modelo matemático. Por isso, o problema de agendamento da colheita florestal pode ser resolvido por meio da programação linear inteira binária.

As empresas florestais enfrentam o desafio de adaptar as atuais metodologias de programação de colheita para atender às crescentes preocupações ambientais, particularmente as de proteção de espécies e habitats naturais, enquanto minimamente renunciam seus ganhos econômicos (GOOYCOLEA *et al.*, 2009).

A introdução de relações espaciais contribui para a construção de áreas mais resistentes a impactos naturais (GOMIDE *et al.*, 2010). Para Augustynczik (2014), as restrições de área máxima de colheita proporcionam benefícios a fauna e reduzem impactos ao solo florestal causado pelo maquinário. Apesar disso, a fragmentação causada por restrições de limite de área máxima também pode causar alguns efeitos negativos, como a redução a área de habitat interior e o aumento nos custos das

operações de colheita. No planejamento florestal espacial, o talhão passa a ser observado segundo seu tamanho, forma e distribuição dentro da floresta, fato que não ocorre no planejamento florestal tradicional (GOMIDE *et al.*, 2010).

Neste trabalho será considerado o corte raso. Nesta modalidade, segundo Correa (2020), a seleção do agendamento ocorre para todo o talhão ao mesmo tempo.

As principais características dos modelos matemáticos aplicados neste estudo são: a imposição de restrições que determinam que cada talhão da floresta seja designado uma única vez para colheita durante todos os períodos do HP; a determinação da variação máxima na produção volumétrica em cada período a fim de atender a demanda e evitar grandes flutuações no suprimento de madeira ao longo do HP; restrições de área máxima. Em alguns cenários, também são aplicadas restrições de área mínima, agregação de talhões e determinação de distâncias máximas entre talhões para a formação de blocos de colheita. Também é realizada a comparação da utilização da FO de maximização de adjacências entre pares de talhões com a FO de maximização do VPL da floresta.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos sobre planejamento florestal e programação linear que ajudarão no entendimento do problema abordado.

3.1 TRABALHOS CORRELATOS

Com relação aos conceitos iniciais de Programação Linear, a principal referência utilizada foi Belfiore e Fávaro (2013).

McDill, Rebain e Braze (2002) abordam o problema de agendamento da colheita florestal com restrições de adjacência considerando as restrições do tipo *Area Restriction Model* (ARM) considerando duas formulações: *Path* e GMU. A primeira considera os blocos que excedem a área máxima permitida para a colheita para formar as restrições, gerando um número exponencial de restrições. A segunda abordagem considera a formação de blocos que não excedem a área máxima, gerando um número exponencial de variáveis.

Crowe, Nelson e Boyland (2003) propuseram uma formulação ARM para obter soluções exatas, utilizando o algoritmo *branch-and-bound*. Os autores mostraram que problemas menores ou até de tamanho médios podem ter solução ótima em períodos de tempos razoáveis com a aplicação do modelo proposto. Porém os mesmos autores encontraram problemas em determinadas instâncias maior quantidade de variáveis de decisão e número de blocos, limitando a aplicabilidade do método para problemas maiores.

Constantino, Martins e Borges (2008) apresentam um modelo matemático de programação linear inteira mista (PLIM) para o problema de agendamento da colheita florestal, considerando a abordagem ARM com um número polinomial de variáveis e restrições, não necessitando de formação de *clusters* a priori.

Gomide, Arce e Silva (2009) analisaram o efeito das restrições espaciais de adjacência no agendamento da colheita florestal, utilizando a programação linear inteira, seguindo o modelo tipo I de Johnson e Scheurmann (1977) de maximização do VPL em uma floresta composta por 52 talhões de eucalipto com a criação de quatro cenários, dos quais os resultados indicaram sucesso no controle de corte de talhões adjacentes e o impedimento na formação de extensas áreas contíguas.

A dissertação de Augustynczik (2014) aborda a otimização do planejamento florestal, considerando restrições de áreas mínimas e máximas de colheita e foi a principal referência utilizada para os conceitos iniciais de planejamento florestal e da forma como está organizado hierarquicamente.

O artigo de Augustynczik *et al.* (2015) avalia os impactos das restrições do tipo URM e ARM sobre os valores da função objetivo e na complexidade do modelo de otimização, concluindo que a abordagem ARM é mais complexa do que a URM, demandando algoritmos mais complexos para a formulação do modelo matemático e maior tempo de processamento para a resolução.

Correa e Scarpin (2019) apresentam um modelo com base na formulação apresentada por Constantino, Martins e Borges (2008), com o objetivo de maximizar o VPL da floresta, trabalhando com restrições de área máxima como abordagem ambiental e ao mesmo tempo com a agregação de talhões, atendendo aos aspectos econômicos. A aproximação de blocos de anos consecutivos pode minimizar custos operacionais, pois as chances de utilizar estradas com manutenção realizadas em ano anterior aumentam.

Sfeir (2020) apresenta uma revisão de literatura sistemática sobre as abordagens ARM e URM e propõe um modelo matemático integrando decisões relacionadas à colheita, transporte e abastecimento utilizando restrições de adjacência.

Correa (2020) aborda o problema de agendamento de colheita florestal de nível tático em um horizonte de planejamento de 5 anos, considerando a restrição espacial ARM e incluindo desigualdades válidas no modelo PLIM apresentado, a partir da relaxação do modelo e da análise das relações das variáveis respostas obtidas.

3.2 PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional (PO), em inglês *Operations Research* (OR), consiste na utilização de modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais para a tomada de decisões. Seu surgimento ocorreu na Inglaterra durante a Segunda Guerra Mundial para a solução de problemas de natureza logística, tática e de estratégia militar.

Os resultados positivos alcançados pelo grupo de cientistas ingleses fizeram com que a Pesquisa Operacional fosse disseminada nos Estados Unidos e, em 1947, a equipe liderada por George B. Dantzig deu origem ao método Simplex para resolução de problemas de programação linear. Desde então, esse conhecimento vem sendo aplicado, com sucesso, para a otimização de recursos em diversos segmentos industriais e comerciais de várias áreas de negócio. (BELFIORE; FÁVARO, p. 2, 2013)

A Pesquisa Operacional e, em particular, a Programação Matemática tratam de problemas de decisão e faz uso de modelos matemáticos que procuram representar o problema real (ARENALES *et al.*, 2007). A partir de variáveis e da definição de relações matemáticas entre elas, o comportamento do sistema é descrito, formulando um modelo matemático. De acordo com Arenales *et al.* (2007), após a resolução do modelo matemático, onde valores para as incógnitas são determinados, o modelo deve ser validado, verificando se as soluções obtidas são compatíveis com a realidade.

A PO tem avançado com o tempo, devido ao aumento da velocidade de processamento e ao aumento da quantidade de memória de computadores, tornando a possível solução de problemas cada vez mais complexos.

3.2.1 Programação Linear

A Programação Linear (PL) é uma das principais ferramentas da PO para a utilização mais eficaz de recursos. Sua aplicação está cada vez mais difundida no mundo acadêmico e gerencial, podendo ser aplicada em diversas áreas. A grande motivação é a enorme economia que pode ser gerada para as indústrias que a utilizam (BELFIORE; FÁVARO, 2013).

Para Belfiore e Fávaro (2013), um modelo de programação linear tem as seguintes características:

- A função objetivo e todas as restrições do modelo são lineares;
- As variáveis de decisão são contínuas, ou seja, podem assumir quaisquer valores em um intervalo de números reais.

O objetivo consiste em determinar a solução ótima do modelo, que é aquela que maximiza ou minimiza a função objetivo e satisfaz todas as restrições do modelo,

representadas por equações ou inequações lineares, incluindo as de não negatividade das variáveis de decisão.

Segundo os mesmos autores, um modelo é chamado de programação linear binária ou programação linear inteira quando, no problema de programação binária ou inteira, a função objetivo e as restrições do modelo descrito forem representadas por funções lineares das variáveis de decisão. Quando temos variáveis discretas e contínuas, chamamos o modelo de programação linear inteira mista (PLIM).

Na TABELA 1, são apresentados os tipos de modelo e suas diferenças em relação ao tipo de variável, função objetivo e restrições:

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR, BINÁRIA E INTEIRA E SUAS EXTENSÕES

Tipo de Modelo	Função Objetivo	Restrições	Tipo de Variável
Programação Linear (PL)	Linear	Linear	Contínua
Programação Linear Inteira (PLI ou PI)	Linear	Linear	Discreta
Programação Linear Inteira Mista (PLIM)	Linear	Linear	Discreta e Contínua
Programação Linear Binária (PLB ou PB)	Linear	Linear	Binária
Programação Linear Binária Mista (PLBM ou PBM)	Linear	Linear	Binária e Contínua
Programação Linear Inteira Binária (PLIB ou PIB)	Linear	Linear	Discreta e Binária

FONTE: Adaptado de BELFIORE; FÁVARO (2013).

3.3 PLANEJAMENTO FLORESTAL

O planejamento florestal é fundamental para a tomada de decisão, para selecionar e avaliar planos e alcançar as metas estabelecidas. É um processo que envolve empresas, extensas áreas florestais e diferentes níveis de atividades.

Manejar a floresta sem o planejamento adequado, tomando decisões baseadas apenas em considerações de curto prazo, pode acarretar em consequências indesejáveis ou inesperadas. Como resultado, o processo de planejamento é um importante aspecto do manejo florestal. (AUGUSTYNCZIK, 2014, p. 4)

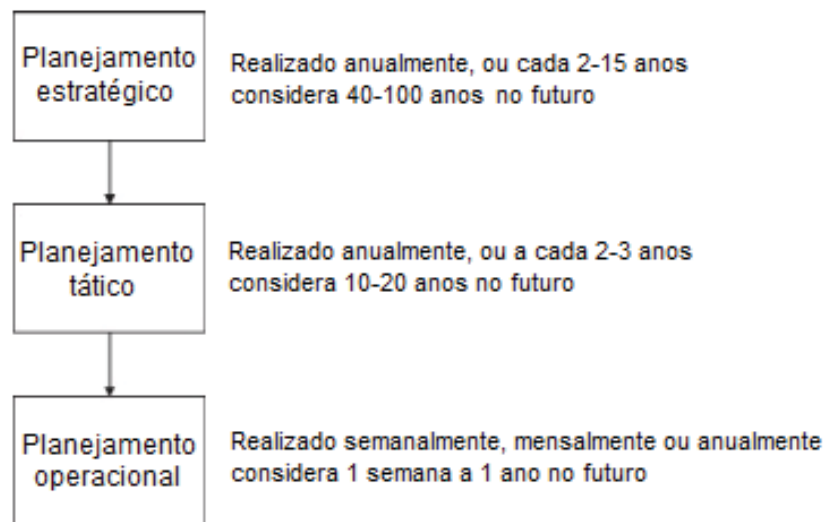
De acordo com McDill (2014), o planejamento tem importância especial nas operações florestais, pois muitos objetivos do manejo levam muito tempo para serem alcançados, demandando a coordenação das ações durante um longo período. As plantações maduras que estão prontas para a colheita são o resultado de uma série de decisões de manejo ao longo de muitos anos e muitas vezes décadas, fazendo com que as atividades florestais tenham consequências a longo prazo.

As decisões de regeneração influenciam as condições do povoamento durante toda a rotação; controle de competição e tratamentos de desbaste alteram a estrutura de um povoamento até o final da rotação; e a decisão de colher um talhão agora significa que o talhão não estará disponível para colheita novamente por muitos anos (MCDILL, 2014, p. 28).

O planejamento florestal é dividido hierarquicamente em três níveis: estratégico, tático e operacional. Para McDill (2014), os níveis de planejamento florestal diferem principalmente em termos de escalas espaciais e temporais.

A divisão dos níveis de planejamento ocorre de acordo com as atividades desenvolvidas e conforme o período de aplicação, sendo de longo prazo (20 anos ou mais), médio prazo (de 5 a 20 anos) e curto prazo (1 ano ou mais). Segundo Correa (2020), uma das diferenças entre os níveis de planejamento florestal é o horizonte de planejamento (HP), que consiste no período do tempo ao longo do qual serão considerados diferentes objetivos e restrições. A FIGURA 1 apresenta cada um dos níveis do planejamento florestal e seus prazos de realização.

FIGURA 1 – FASES DO PLANEJAMENTO FLORESTAL



FONTE: AUGUSTYNICZIK (2014).

McDill (2014) enfatiza que o planejamento deve ter metas específicas e quantificadas, porém é impossível prever tudo o que pode acontecer. Até mesmo as metas e objetivos de uma organização evoluem, tornando necessário realinhar o plano com a situação atual. Por conta disso, a flexibilidade é necessária nas organizações, promovendo adaptações conforme circunstâncias que estão em constante mudança, tornando o planejamento um processo contínuo.

A TABELA 2 mostra as atividades desenvolvidas nos níveis de planejamento florestal e seus respectivos horizontes de planejamento de forma resumida.

TABELA 2 – ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NOS NÍVEIS DE DECISÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTO FLORESTAL

Nível de Planejamento	Horizonte de Planejamento	Manejo Florestal e Colheita	Transporte e Roteamento	Produção
Estratégico	> 5 anos	Plantio, estimativas de produção e de colheita a longo prazo	Construção e manutenção de estradas e gestão de frotas	Definição do plano de investimento
Tático	De 6 meses a 5 anos	Planejamento da colheita em períodos anuais	Manutenção de estradas e utilização de equipamentos	Planejamento da produção anual
Operacional	De 1 dia a 6 meses	Agendamento de equipes e sequenciamento de colheita	Definição da área de captação, planejamento do arraste	Dimensionamento dos lotes, agendamento

FONTE: Adaptado de RÖNNQVIST (2003) e SANTOS (2019).

Segundo Rönqvist (2003), modelos e métodos de otimização têm sido aplicados para resolução de problemas de planejamento florestal há mais de 30 anos e, durante esse período, os problemas evoluíram quanto a diversidade de problemas de decisão e aos tamanhos das tarefas de planejamento, levando a modelos maiores e com restrições de maior complexidade.

A indústria florestal enfrenta desafios diretamente ligados às novas demandas e integração com novas tecnologias. Além disso, os gestores florestais podem ter que trabalhar simultaneamente na produção de madeira, energia, recreação, biodiversidade, controle de enchentes, qualidade da água e proteção do habitat da vida selvagem (FRANÇA *et al.*, 2022).

Conforme França *et al.* (2022), as exigências ambientais globais têm impulsionado importantes mudanças nos modelos de planejamento florestal. De acordo com os mesmos autores, essas mudanças abrangem uma série de problemas envolvendo a forma dos talhões, os regimes de manejo, adjacências, determinação de áreas máximas e mínimas de colheita, conectividade com ecossistemas naturais,

fragmentação da paisagem e problemas envolvendo construção e manutenção de estradas.

Segundo McDill (2014), embora o planejamento seja dividido em três níveis que devem ser realizados de forma independente, é necessário haver algum grau de interação entre as etapas. A soma de todas as decisões operacionais deve ser somada para que os objetivos táticos sejam alcançados e, da mesma forma, as decisões táticas devem ser tomadas de forma que os objetivos estratégicos sejam alcançados (MCDILL, 2014). Portanto, um dos maiores desafios no planejamento florestal hierárquico é determinar como fazer boas ligações entre as diferentes etapas, para que decisões operacionais não sejam imprudentes e que os planos estratégicos sejam operacionalmente viáveis.

A seguir, são apresentadas as definições de cada um dos níveis de planejamento florestal.

3.3.1 Planejamento Estratégico

O planejamento estratégico tem como objetivo a obtenção de níveis de colheita sustentáveis e geralmente é realizado para áreas e horizontes de planejamento extensos (longo prazo).

Para Augustynczyk (2014), o planejamento florestal estratégico geralmente tem os objetivos de maximização do valor presente da floresta, da regulação do fluxo de madeira para o abastecimento da indústria e atualmente também inclui questões ambientais que visam a sustentabilidade dos recursos florestais.

McDill (2014) afirma que as decisões estratégicas do manejo florestal abordam metas de longo prazo de colheita, potencialmente por espécie e tipo de produto, e a identificação da futura estrutura florestal desejada, incluindo a composição das espécies-alvo e a distribuição das classes de idade da floresta. Como o desenvolvimento da floresta ocorre durante décadas, é necessário considerar os impactos em longo prazo das atividades realizadas, fazendo com que o planejamento florestal estratégico tenha horizontes de planejamento de ao menos uma rotação

Conforme apresentado em Correa (2020), os gestores analisam simulações ou otimização de florestas a longo prazo para tomada de decisão, sendo necessária a determinação da melhor época para colheita de grandes áreas, alocação de recursos e expansão da capacidade. Devido ao grande escopo espacial e temporal

dos problemas de planejamento estratégico, pode não ser possível ou mesmo útil incluir informações espaciais detalhadas no modelo (MCDILL, 2014). Desta forma, os planos realizados em nível estratégico geralmente não possuem um alto grau de especificidade das informações espaciais.

De acordo com Augustynczik (2014) esta é a fase na qual as técnicas de pesquisa operacional são mais utilizadas e possuem o maior impacto.

3.3.2 Planejamento Tático

O planejamento tático é realizado pelos gestores em médio prazo. O planejamento tático envolve basicamente qualquer tipo de planejamento que seja mais amplo do que o planejamento operacional e não amplo o suficiente para ser estratégico (MCDILL, 2014).

Segundo Augustynczik (2014), dentro do planejamento estratégico, o planejamento tático tem como objetivo programar colheitas em áreas específicas e considera assuntos relacionados à localização espacial e temporal das atividades de manejo. Algumas atividades como a definição de rotas de estradas de acesso e decisão dos talhões que serão colhidos dentro de um horizonte de planejamento de 1 a 5 anos pertencem a este nível.

Abordado em nível tático, o problema de agendamento da colheita florestal requer a utilização de variáveis binárias pela necessidade de colher totalmente um talhão, ao invés de fazê-lo parcialmente, e ainda respeitar o uso de restrições espaciais (GOMIDE *et al.*, 2013).

Para McDill (2014), decisões sobre construção, manutenção e fechamento de estradas também pertencem ao nível tático de planejamento florestal.

3.3.3 Planejamento Operacional

O planejamento operacional trata de questões detalhadas e de curtíssimo prazo (MCDILL, 2014). Consiste no gerenciamento de trabalhadores e máquinas, diária, semanal ou mensalmente. Trata das tarefas específicas que precisam ser feitas para conseguir os resultados declarados no plano tático (ALCIDES, 2013).

De acordo com Correa (2020) neste nível o HP é dividido em períodos semanais e a tomada de decisão ocorre em torno da colheita, da distribuição do produto, roteirização e fornecimento para clientes.

Conforme Augustynczik (2014) este nível envolve atividades de seleção e localização do maquinário florestal; seleção dos talhões a serem colhidos e decisões sobre o suprimento da demanda de madeira e logística do transporte.

McDill (2014) ressalta que restrições sobre o gerenciamento de trabalhadores e equipamentos raramente são incluídas em modelos táticos ou estratégicos, mas são comuns no planejamento operacional.

3.4 PLANEJAMENTO FLORESTAL ESPACIAL

O planejamento espacial identifica e expõe os componentes da paisagem auxiliando a uma tomada de decisão mais consciente sobre os aspectos ecológicos do ecossistema (GOMIDE, 2009). No planejamento espacial, para considerar questões ambientais, é necessário introduzir restrições no modelo, tais como restrições de área e de distância entre blocos explorados. Modelos de programação inteira mista espacialmente explícitos geralmente são utilizados para o planejamento tático e operacional (MCDILL, 2014).

Conforme McDill (2014), os modelos de planejamento florestal espacial permitem controlar não apenas quanto de um certo tipo de floresta é agendado durante um determinado período, mas exatamente onde a colheita irá ocorrer, possibilitando planejar a colheita juntamente com a criação das configurações espaciais desejadas na paisagem da floresta. Além disso, o planejamento espacial permite o projeto da infraestrutura de transporte necessária para acessar cada unidade de manejo da forma mais viável do ponto de vista econômico e mais sensível no aspecto ecológico. Para o autor, é provável que pesquisadores e gestores florestais tenham apenas começado a explorar as possíveis aplicações deste tipo de modelo.

3.4.1 Restrições de Adjacência

No conceito de planejamento florestal espacial, o talhão passa a ser observado segundo o seu tamanho, forma e distribuição dentro da floresta, fato que não ocorre no planejamento florestal tradicional (GOMIDE *et al.*, 2010).

Para McDill (2014) a necessidade de reconhecer a localização e o arranjo espacial das dos talhões surge em uma variedade de situações de manejo florestal. Um dos problemas mais estudados é quando há um limite no tamanho máximo de uma abertura de colheita. Na literatura, esse problema é frequentemente apresentado como problema de adjacência, visto que a colheita de um ou mais talhões limita a factibilidade na colheita de outros talhões adjacentes.

Segundo Correa (2020), um aspecto impactante do planejamento tático no problema de agendamento de colheita florestal é a inclusão de restrições espaciais, que aumentam a dificuldade de encontrar uma solução para o problema. Conforme Crowe, Nelson e Boyland (2003), as regulações que especificam o tamanho máximo

de áreas de colheita restringem as atividades de colheita em áreas contíguas por um determinado período, gerando restrições espaciais que tornam mais complexo encontrar soluções ótimas para o problema agendamento da colheita florestal.

A definição utilizada para os talhões adjacentes foi de adjacência tradicional que, de acordo com Gomide *et al.* (2010), ocorre quando talhões se tocam lateralmente e dividem uma linha em comum e não são considerados adjacentes quando só têm um ponto em comum ou são adjacentes somente em encruzilhadas de estradas.

A atividade de colheita pode causar erosão, diminuição da qualidade da água de córregos e rios, interrupção ou perda de espécies nativas e beleza cênica degradada (RÖNNQVIST *et al.*, 2015). Esses impactos ambientais podem ser minimizados com a aplicação de restrições espaciais.

Para McDill, Rebain e Braze (2002), a aplicação de restrições espaciais de adjacência em modelos de agendamento da colheita florestal previne que talhões adjacentes sejam selecionados para a colheita em um mesmo período de tempo.

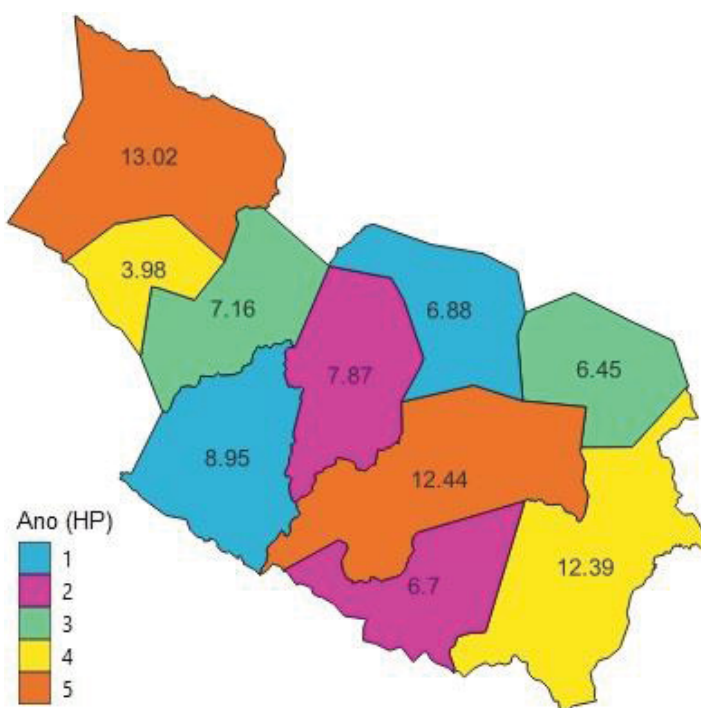
A inclusão de restrições de adjacência a fim de satisfazer uma restrição de área máxima de colheita permite que talhões adjacentes sejam colhidos, desde que suas áreas combinadas sejam menores do que a área máxima de colheita previamente determinada. De acordo com McDill, Rebain e Braze (2002), restringir o modelo desnecessariamente, proibindo a colheita de qualquer par de talhões contíguos, geralmente leva a soluções subótimas, porém quase todas as formulações de otimização de manejo florestal apresentadas na literatura que incluem restrições de adjacência têm colheitas proibidas em todos os talhões adjacentes.

O limite de área máxima permitida para a colheita em um mesmo período varia conforme as leis do estado ou país da floresta em questão. Por exemplo, de acordo com Goycoolea *et al.* (2005), em Oregon o máximo permitido é 49 ha, na Califórnia 17 ha e na Suécia, o limite é de 20 ha. Os mesmos autores afirmam que se assumirmos que os talhões têm menos do que 49 ha e são maiores que 25 ha, se um talhão é colhido em um determinado período, nenhum de seus talhões vizinhos podem ser colhidos naquele mesmo período ou durante vários períodos sucessivos até a regeneração ocorrer. Esse conceito de tempo é chamado de *green-up* e tem como objetivo a regeneração da área colhida, mitigando o desmatamento de grandes áreas em períodos próximos do HP.

Existem duas abordagens para o planejamento florestal espacial: *Unit Restriction Model* (URM) e *Area Restriction Model* (ARM). Augustynczik *et al.* (2015) apresenta a diferença entre os dois tipos: nas restrições URM não é permitido que talhões adjacentes sejam colhidos no mesmo ano do HP. Por outro lado, a abordagem ARM permite que talhões contíguos sejam colhidos no mesmo período do HP, desde que a área do bloco formado não ultrapasse a área máxima de corte determinada. A semelhança entre as duas abordagens está na necessidade do uso de variáveis inteiras (GOMIDE *et al.*, 2010).

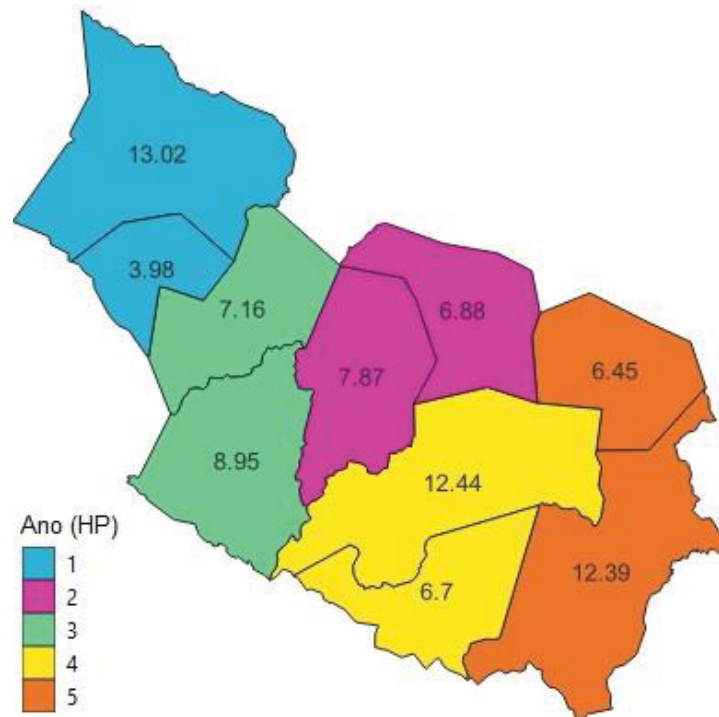
Na FIGURA 2 é apresentado um exemplo da abordagem URM, em um HP de 5 anos, onde talhões adjacentes não são colhidos no mesmo ano. A FIGURA 3 mostra uma solução factível na abordagem ARM para a mesma floresta, com a imposição de área máxima de 20 ha, ocorrendo a formação de blocos de talhões adjacentes seleccionados para colheita no mesmo período.

FIGURA 2 – EXEMPLO DE SOLUÇÃO FACTÍVEL DA ABORDAGEM URM



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 3 – EXEMPLO DE SOLUÇÃO FACTÍVEL DA ABORDAGEM ARM COM ÁREA MÁXIMA DE 20 HA



FONTE: A autora (2023).

Para Tóth *et al.* (2013), as abordagens URM e ARM são NP-Hard, isso significa que o tempo de solução para esses problemas aumenta exponencialmente em função do número de variáveis e restrições dos modelos.

3.4.2 Unit Restriction Model (URM)

Segundo Gomide *et al.* (2013), as restrições de adjacência do tipo URM impedem o corte de quaisquer talhões adjacentes do projeto para o mesmo período de tempo. É um tipo de restrição mais rígido, pois não contempla a área dos talhões envolvidos para o corte.

Conforme Gomide, Arce e Silva (2010), o surgimento e resolução de modelos com restrições do tipo URM ocorreu na década de 70, sendo uma abordagem mais antiga do que a ARM.

3.4.3 Area Restriction Model (ARM)

As restrições do tipo ARM são consideradas como uma extensão das restrições URM, mas permitem que talhões vizinhos sejam colhidos no mesmo período de tempo, desde que a área total colhida não ultrapasse o limite máximo definido (BORGES *et al.*, 2014).

Correa (2020) afirma que agregação de talhões é a consequência da abordagem ARM levando-se em consideração a área máxima de corte, sendo possível a formação de blocos de talhões para corte no mesmo período.

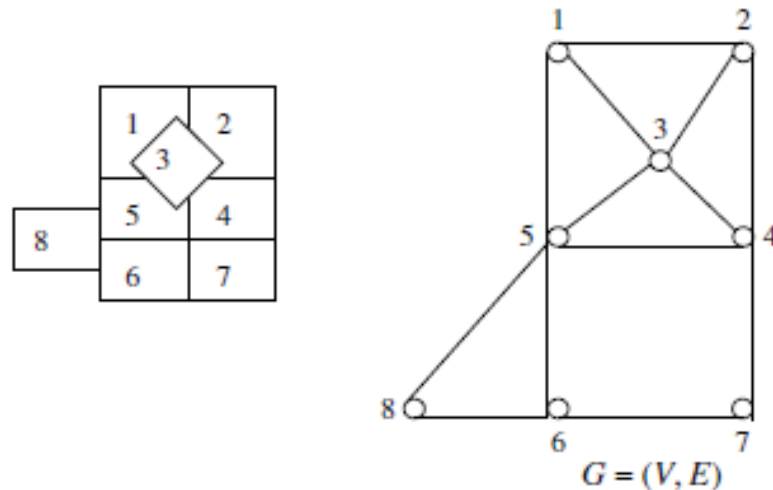
De acordo com Gooycolea *et al.* (2009), o planejamento da colheita com aplicação da abordagem ARM tem objetivo de maximizar o VPL da floresta e é composto pelos seguintes conjuntos de restrições:

- Restrições de produção volumétrica de madeira: considerado um requisito típico nas operações da silvicultura, é necessário que a floresta produza um fluxo uniforme de madeira durante o horizonte de planejamento. Para cada período de tempo, a quantidade de madeira extraída não deve ser superior a uma porcentagem determinada do que foi extraído no período anterior. Variantes dessa restrição podem considerar imposição de requisitos de volume mínimo e máximo em diferentes períodos de tempo;
- Restrições de idade média final: determina a idade média dos talhões permitida no fim do HP;
- Restrições de colheita única: cada talhão pode ser colhido no máximo uma vez durante o horizonte de planejamento. Segundo Gooycolea *et al.* (2009), assume-se implicitamente a preocupação apenas com a primeira colheita, pois os povoamentos replantados não atingirão uma idade rentável no horizonte de planejamento;
- Restrições de tamanho máximo de corte raso: determina que nenhum grupo contíguo de talhões colhidos em um mesmo período de tempo pode exceder um limite de área previamente determinado.

Para as formulações ARM, segundo Constantino, Martins e Borges (2008), a floresta é representada por um grafo $G = (V, E)$, onde cada vértice I corresponde a um talhão da floresta e cada aresta do conjunto E representa a conexão entre pares

de talhões adjacentes. Por exemplo, ao considerar uma floresta de 8 talhões, a sua representação como um grafo é mostrada na FIGURA 4.

FIGURA 4 – EXEMPLO DE FLORESTA REPRESENTADA COMO UM GRAFO



Fonte: CONSTANTINO; MARTINS; BORGES (2008).

Segundo Augustynczik (2014), inicialmente a abordagem ARM era considerada impossível de formular de maneira linear, só era possível encontrar soluções utilizando métodos heurísticos. A resolução de problemas florestais envolvendo as restrições ARM pelo método exato só surgiu a partir do trabalho de McDill *et al.* (2002) (GOMIDE; ARCE; SILVA, 2010).

Conforme Martins, Alvelo e Constantino (2010), existem algumas razões para a preferência por abordagens exatas de programação inteira em vez de heurísticas no planejamento da colheita florestal: em cada etapa, eles fornecem uma medida da qualidade da solução mais conhecida e podem, portanto, ser interrompidos caso essa solução seja satisfatória; novas restrições podem ser facilmente adicionadas; os aumentos nas velocidades de hardware e software de computadores os tornam abordagens promissoras para resolver modelos ARM em um tempo razoável.

A literatura apresenta três formulações ARM, influenciando na quantidade de variáveis e/ou restrições do modelo matemático. De acordo com Cerveira *et al.* (2014), a formulação *Path*, que tem um número exponencial de restrições, a formulação *Cluster*, que possui um número exponencial de variáveis e a formulação *Bucket*, com um número polinomial de variáveis e restrições.

A primeira formulação, *Path Algorithm*, foi proposta por McDill, Rebain e Braze (2002). Essa formulação enumera de forma recursiva todos os conjuntos de talhões que excedem a área máxima definida pelo problema, criando restrições para cada uma das infactibilidades identificadas (SFEIR, 2020). O algoritmo *Path* consiste nos seguintes passos:

QUADRO 1 – PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO PATH

```

1 - Inicie o primeiro talhão
2 - Calcule o somatório da área
3 - Caso a área seja inferior ao limite mínimo estabelecido vá ao passo 4
   Caso a área seja superior ao limite mínimo e inferior ao limite máximo
   escreva a restrição
   Caso a área seja superior ao limite máximo passe ao próximo bloco
4 - Adicione recursivamente um talhão adjacente ao bloco considerado
   e volte ao passo 2
5 - Caso todos os talhões tenham passados pelo passo 1, pare
  
```

FONTE: AUGUSTYNICZIK (2014).

A segunda abordagem, *Generalized Management Units* (GMU) ou *Cluster*, foi apresentada por McDill, Rebain e Braze (2002). Diferente da abordagem *Path*, essa formulação considera que cada bloco formado não pode exceder a área máxima permitida. Variáveis para cada combinação possível de unidades (blocos) contíguos são utilizadas no modelo. Para cada par de blocos adjacentes, uma restrição de adjacência é determinada, onde o conjunto de variáveis de decisão inclui todas as variáveis correspondentes às unidades que contém as variáveis originais (TÓTH *et al.*, 2012). Segundo Tóth *et al.* (2013), as GMUs precisam ser enumeradas antes da construção do modelo matemático e as restrições URM podem ser escritas como conjuntos de GMUs. Com o modelo GMU, o número de variáveis cresce exponencialmente conforme o raio de área máxima permitida é aumentado (TÓTH *et al.*, 2013).

A terceira formulação, *Bucket*, ou *Area Restriction with Stand-Clear-Cut Variables* (ARMSC) foi proposta por Constantino, Martins e Borges (2008). Nesta abordagem, cada talhão deve ser designado a um único *bucket*. Talhões designados para um mesmo *bucket* devem ser vizinhos e a soma de suas áreas não deve ultrapassar o limite determinado no modelo (SFEIR, 2020).

De acordo com Tóth *et al.* (2013), a formulação *Bucket* é diferente das duas primeiras formulações propostas, pois não depende de enumerar recursivamente, a priori, todos os blocos que ultrapassam a área máxima e são inactiváveis, como no modelo *Path* ou todas as combinações de talhões factíveis, como na abordagem GMU. Além disso, o número de classes de corte, ou *buckets*, não pode exceder o número de talhões floresta e um *bucket* pode compreender talhões desconectados. Segundo os mesmos autores, a formulação apresentada por Constantino, Martins e Borges (2008) leva a problemas menores do que as duas outras formulações exatas quando a área máxima estipulada é grande em relação ao tamanho médio dos talhões da floresta.

Segundo Llorente *et al.* (2017), na abordagem ARM, é muito provável que o tempo necessário para enumerar todas as combinações de talhões que excedem a área máxima determinada seja mais demorado do que resolver o modelo, porém uma vez identificada, essa lista de restrições pode ser utilizada para aplicação em vários modelos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi fundamentado em uma floresta hipotética com área total de aproximadamente 1152,57 ha, subdividida em 100 talhões de *Pinus taeda*, enumerados de 0 a 99. Cada talhão tem em média 11,5 ha de área. A idade inicial dos talhões variou entre 11 e 15 anos. É permitido que talhões com idades entre 13 e 19 anos sejam selecionados para colheita. Como será abordado o planejamento tático, foi considerado plano de colheita de 5 anos, considerando períodos anuais. Os dados utilizados foram os mesmos apresentados em Correa *et al.* (2020). A TABELA 3 apresenta as principais características da floresta.

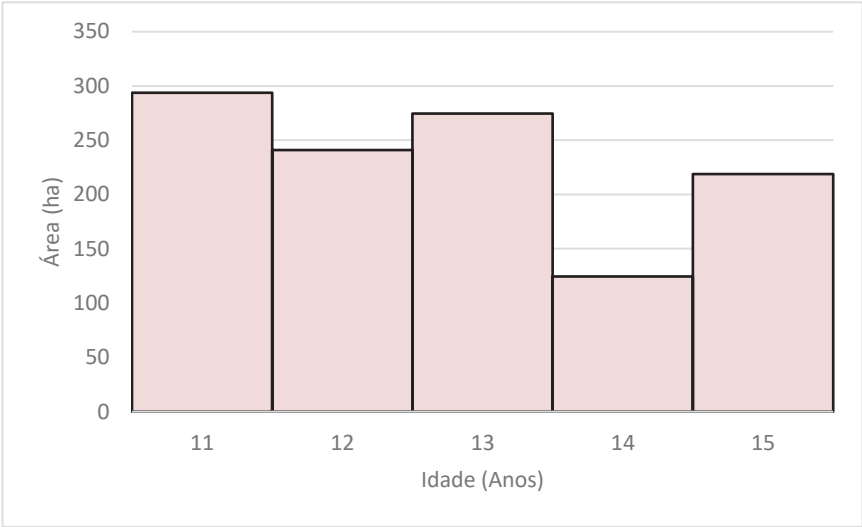
TABELA 3 – ESTRUTURA DA FLORESTA DESTINADA AO PLANEJAMENTO DA COLHEITA

TALHÕES			ÁREA	
Idade	Frequência	%	Área Total (ha)	%
11	21	21%	293,76	25,49%
12	25	25%	240,95	20,91%
13	19	19%	274,66	23,83%
14	10	10%	124,4	10,79%
15	25	25%	218,8	18,98%
TOTAL	100	100%	1152,57	100%

FONTE: A autora (2023).

A FIGURA 5 mostra a distribuição inicial de idade dos 100 talhões da floresta.

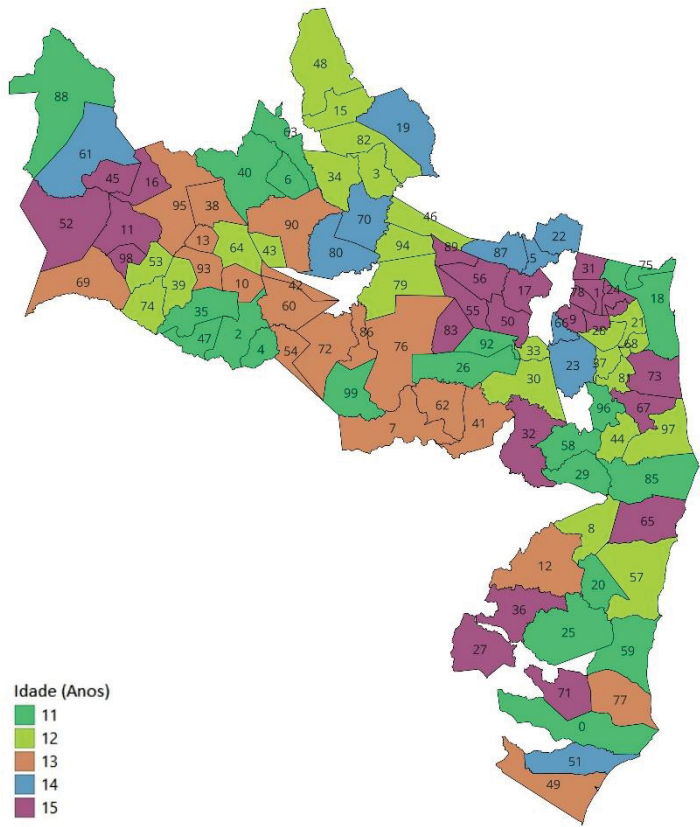
FIGURA 5 – DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE IDADE DOS TALHÕES



FONTE: A autora (2023).

A distribuição espacial dos talhões por idade no início do horizonte de planejamento é apresentada na FIGURA 6.

FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL POR IDADE DOS TALHÕES



FONTE: A autora (2023).

A floresta produz dois tipos de sortimentos: serraria e celulose. Para determinar os valores hipotéticos de receita de sortimentos foi considerado o valor de R\$70,00 para celulose e R\$ 110,00 para serraria. Já os custos de colheita florestal são de R\$ 28,00 para cada m³. Por fim, o custo administrativo foi de R\$ 150,00 por hectare em cada ano, conforme Correa (2020).

O número médio de adjacências por talhão na área estudada é aproximadamente 5. Sendo n_i o número de talhões adjacentes ao talhão i , a TABELA 4 apresenta as características da área de estudo:

TABELA 4 – ADJACÊNCIAS POR TALHÃO

n_i	Frequência	%
1	4	4%
2	5	5%
3	16	16%
4	22	22%
5	22	22%
6	17	17%
7	8	8%
8	4	4%
9	2	2%
TOTAL	100	100%

FONTE: A autora (2023).

4.2 MODELO MATEMÁTICO

Neste capítulo, são apresentados os modelos matemáticos para o problema de agendamento da colheita florestal. No primeiro modelo, considerou-se a função objetivo de maximização do VPL da floresta. No segundo, a função objetivo maximiza as adjacências entre pares de talhões, visando a formação de blocos de colheita.

4.2.1 Maximização do VPL

O modelo matemático aplicado para o problema de agendamento da colheita florestal, com objetivo de maximizar o VPL, segue as notações apresentadas na TABELA 5.

TABELA 5 – SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO MATEMÁTICO

(continua)

Índices	Descrição
i, k	Talhões: $1, \dots, N$
j	Períodos do horizonte de planejamento
b	Blocos gerados no período $j : 1, \dots, B$
Conjuntos	Descrição
I	Conjunto de talhões
B	Conjunto de blocos de talhões gerados no período j
J	Conjunto de anos no horizonte de planejamento
U	Conjunto de talhões que devem ser selecionados para colheita no primeiro ano do HP
K	Conjunto de pares ordenados de talhões adjacentes
R	Conjunto de pares ordenados de talhões com distância maior do que a distância permitida para a agregação de talhões no mesmo bloco

TABELA 5 – SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO MATEMÁTICO

(continua)

Conjuntos	Descrição
$\delta(i)$	Conjunto de talhões adjacentes ao talhão i
Parâmetros	Descrição
c_{ij}	Valor presente líquido (VPL) total de cada unidade de manejo i colhida no ano j
v_{ij}	Volume gerado pelo talhão i quando colhido no ano j
A_{max}	Área máxima para colheita
A_{min}	Área mínima para colheita
$\delta(i)$	Conjunto de talhões adjacentes ao talhão i
n_i	Coefficiente que indica o número de talhões adjacentes ao talhão i
$\lambda(i)$	Blocos de talhões i com área superior a A_{max}
$w(i)$	Número de talhões em $\lambda(i)$
a_i	Área do talhão i
d_j	Demanda no período j
α	Percentual de variação do volume em relação a demanda
δ_{ik}	Distância em número de arcos entre os talhões i e k
Δ_{Bloco}	Distância máxima permitida (em arcos) entre dois talhões no mesmo período e mesmo bloco
Δ_{Ano}	Distância máxima permitida (em arcos) entre dois talhões no mesmo período, mas em blocos diferentes
Δ_{Consec}	Distância máxima permitida (em arcos) entre dois blocos em períodos consecutivos
γ_i	Idade do talhão i no início do HP

TABELA 5 – SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO MATEMÁTICO
(conclusão)

Parâmetros	Descrição
γ_{min}	Idade mínima para colheita de um talhão
τ	Percentual mínimo de abertura de um novo bloco em determinado período
ω_{ik}	Elemento da matriz de adjacências: 1, se os talhões i e k forem adjacentes 0, caso contrário
Variáveis de Decisão	Descrição
x_{ij}	1, se o talhão i for colhido no ano j 0, caso contrário
x_{ijb}	1, se o talhão i for colhido no ano j no bloco b 0, caso contrário
z_{jb}	1, se o bloco b for gerado no ano j 0, caso contrário

FONTE: A autora (2023).

$$Max Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^H c_{ij} x_{ij} \quad (4.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^H x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq (1 + \alpha). d_j \quad \forall j \in J \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq (1 - \alpha). d_j \quad \forall j \in J \quad (4.4)$$

$$\sum_{k \in \delta(i)} x_{kj} \leq n_i (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in \lambda(i)} x_{ij} \leq w(i) - 1 \quad \forall \lambda(i), \forall j \in J \quad (4.6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (4.7)$$

A função objetivo do modelo (4.1) maximiza o VPL da floresta. Os conjuntos de restrições (4.2) e garantem que os talhões possam ser agendados no máximo uma vez durante o horizonte de planejamento. (4.3) e (4.4) são as restrições de equilíbrio do modelo e visam evitar grandes flutuações no suprimento de madeira ao longo do HP (AUGUSTYNCZIK *et al.*, 2015). No modelo, foi utilizado como referência o parâmetro d_j , que representa a demanda para cada período j , permitindo um percentual de variação α do volume em relação a demanda. (4.5) representa o conjunto de restrições do tipo URM, baseada em McDill, Rebain e Braze (2002) e Augustynczik (2014). O conjunto (4.6) representa as restrições do tipo ARM *Path*, que garantem que nenhum bloco com área superior à área limite estabelecida seja colhido em um mesmo ano do HP. (4.7) determina o domínio das variáveis de decisão do modelo.

Para a aplicação da abordagem ARM *Bucket*, é preciso adicionar um índice b à variável de decisão x_{ijb} . Nesta abordagem, o modelo também considera a variável binária z_{jb} , que assume valor 1 quando o bloco b for gerado no período j .

Correa e Scarpin (2020) apresentam uma adaptação do modelo proposto por Constantino, Martins e Borges (2008) para a abordagem ARM, adicionando restrições que consideram aspectos econômicos na formulação, visando a agregação de talhões e aproximação de blocos no mesmo período, conforme a formulação abaixo:

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^H \sum_{b=1}^B c_{ij} x_{ijb} \quad (4.8)$$

Sujeito a:

$$\sum_{b=1}^B \sum_{j=1}^H x_{ijb} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.9)$$

$$\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ijb} \leq (1 + \alpha) \cdot d_j \quad \forall j \in J \quad (4.10)$$

$$\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ijb} \geq (1 - \alpha) \cdot d_j \quad \forall j \in J \quad (4.11)$$

$$\sum_{i=1}^N a_i x_{ijb} \leq A_{max} z_{jb} \quad \forall j \in J, \forall b \in B \quad (4.12)$$

$$\sum_{i=1}^N a_i x_{ijb} \geq A_{min} z_{jb} \quad \forall j \in J, \forall b \in B \quad (4.13)$$

$$x_{ijb} + x_{kjc} \leq 1 \quad \begin{array}{l} \forall (i, k) \in K, \\ \forall j \in J, \forall b \in B, \\ c = b + 1, \dots, B \end{array} \quad (4.14)$$

$$\delta_{ik}(x_{ijb} + x_{kjb} - 1) \leq \Delta_{Bloco} \quad \begin{array}{l} \forall i, k \in I, \\ k > i, \forall j \in J, \forall b \in B \end{array} \quad (4.15)$$

$$\delta_{ik}(x_{ijb} + x_{kjc} - 1) \leq \Delta_{Ano} \quad \begin{array}{l} \forall i, k \in I, \\ k > i, \forall j \in J, \end{array} \quad (4.16)$$

$$\delta_{ik}(x_{ijb} + x_{k(j+1)c} - 1) \leq 2\Delta_{Consec} \quad \begin{array}{l} \forall b, c \in B, \ c \neq b \\ \forall i, k \in I, \forall b, c \in B \\ j = 1, \dots, |J| - 1 \end{array} \quad (4.17)$$

$$x_{ijb} + x_{k(j+1)c} \leq 1 \quad \begin{array}{l} \forall (i, k) \in K, \forall b, c \in B \\ j = 1, \dots, |J| - 1 \end{array} \quad (4.18)$$

$$z_{j1} = 1 \quad \forall j \in J \quad (4.19)$$

$$x_{i11} = 1 \quad \forall i \in U \quad (4.20)$$

$$(\gamma_i + j - 1) \cdot x_{ijb} \geq \gamma_{min} x_{ijb} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall b \in B \quad (4.21)$$

$$x_{ijb} \leq z_{jb} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall b \in B \quad (4.22)$$

$$x_{ijb} + x_{kjb} \leq 1 \quad \begin{matrix} \forall (i, k) \in R, \forall j \in J, \\ \forall b \in B \end{matrix} \quad (4.23)$$

$$z_{jb} \leq \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{(1 + \alpha) \cdot d_j - \sum_{h=1}^{b-1} \sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ijh}}{(1 + \alpha) \cdot d_j} \right) \quad \begin{matrix} \forall j \in J, \\ b = 2, \dots, B \end{matrix} \quad (4.24)$$

$$x_{ijb}, z_{jb} \in \{0, 1\} \quad (4.25)$$

A função objetivo (4.8) maximiza o VPL da floresta, equivalente a (4.1). O conjunto de restrições (4.9) determina que cada talhão será agendado uma única vez durante o HP e será designado em apenas um bloco do período. (4.10) e (4.11) asseguram que a demanda seja atendida em cada período j , respeitando a variação limite α determinada, equivalente as restrições (4.3) e (4.4).

Os conjuntos (4.12) e (4.13) determinam que a soma total da área agendada não ultrapasse os limites de área máxima e mínima. De acordo com Correa (2020), o limite de área mínima possibilita que um conjunto de talhões seja agendado apenas se garantir condições mínimas de corte. As restrições (4.13) correspondem a abordagem ARM *Bucket*, proposta por Constantino, Martins e Borges (2008), onde a imposição do limite de área máxima visa minimizar aspectos ambientais. Essas restrições também são encontradas nos estudos de Correa e Scarpin (2019) e Correa (2020).

A restrição (4.14) assegura que talhões adjacentes não sejam colhidos no mesmo período e blocos diferentes. (4.15) determina a agregação dos talhões em um mesmo período e bloco, respeitando a distância máxima entre talhões Δ_{Bloco} . (4.16) determina a agregação de talhões em blocos diferentes formados no mesmo período, respeitando a distância máxima do parâmetro Δ_{Ano} . O conjunto (4.17) aproxima blocos

de talhões de períodos consecutivos, visando minimizar custos operacionais. Desta forma, é possível aproveitar as mesmas estradas do período anterior, minimizando o custo de manutenção de estradas (CORREA; SCARPIN, 2020).

O conjunto de restrição (4.18) corresponde a restrição de *green-up*, que impede que talhões adjacentes sejam colhidos em períodos consecutivos visando contribuir com aspectos ecológicos. Já no conjunto (4.19) determina que em todo período do HP ocorra a abertura de um bloco. A restrição (4.20) impõe que os talhões pertencentes ao conjunto U sejam selecionados para colheita no primeiro ano do HP.

O conjunto de restrições (4.21) impede que talhões com idade inferior a 13 anos sejam selecionados para colheita. (4.22) representa a desigualdade válida (DV) que relaciona as variáveis do modelo matemático.

A restrição (4.23) determina que dois talhões que possuem distância maior do que a distância permitida para a agregação de talhões não possam ser selecionados para colheita no mesmo bloco.

A restrição (4.24) impõe a abertura de mais um bloco considerando o volume colhido nos blocos anteriores e impede a abertura de um novo bloco se a necessidade de corte for um percentual inferior ao parâmetro τ .

O domínio das variáveis de decisão do modelo matemático é determinado por (4.25).

4.2.2 Maximização de adjacências entre pares de talhões

Uma alternativa para promover a formação de blocos de colheita é a aplicação de um modelo matemático com função objetivo de maximização de adjacências entre pares de talhões durante os períodos do horizonte de planejamento.

Segundo Augustynczik (2014), os problemas de formação de áreas de colheita e agregação de atividades de colheita são relacionados, pois ambos visam a conectividade de áreas florestais. Além disso, são problemas de otimização combinatória complexos que demandam a inclusão de variáveis inteiras e um grande número de restrições, aumentando o tempo computacional para encontrar soluções para problemas de grandes dimensões.

Augustynczik (2014) ressalta que alguns benefícios da agregação de talhões são: a diminuição da movimentação do maquinário de colheita, reduzindo o número de horas improdutivas e redução de investimentos de estradas.

O custo de manutenção e de construção de estradas é reduzido, uma vez que a produção de um grande número de talhões pode ser escoada por uma mesma estrada (STANG, 2016). De acordo com Stang *et al.* (2019), a economia no tempo de transporte obtida pela proximidade das estradas também ocasiona uma redução considerável nos custos de operações.

As operações de manutenção de estradas para o transporte de toras, assim como as operações de colheita, se tornam mais eficientes e o número de vias necessárias para o escoamento da produção é reduzido (AUGUSTYNCZIK, 2014).

O modelo matemático testado, adaptado de Augustynczik (2014) e Correa *et al.* (2020), apresenta uma função objetivo que visa maximizar o número de adjacências durante o horizonte de planejamento, favorecendo a formação de blocos de colheita. Também foram adicionadas restrições ARM utilizando a formulação *Path*, de McDill, Rebain e Braze (2002). A TABELA 6 apresenta as notações utilizadas no modelo e suas respectivas descrições.

TABELA 6 – SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO MATEMÁTICO

(continua)

Índices	Descrição
i, k	Talhões: $1, \dots, N$
j	Períodos do horizonte de planejamento: $1, \dots, H$
Conjuntos	Descrição
I	Conjunto de talhões
H	Conjunto de anos no horizonte de planejamento
$\lambda(i)$	Bloco de talhões i com área superior à área limite
$\delta(E)$	Conjunto de arestas entre talhões adjacentes
Parâmetros	Descrição
c_{ij}	Valor presente líquido (VPL) total de cada unidade de manejo i colhida no ano j
v_{ij}	Volume gerado pelo talhão i quando colhido no ano j
A_{max}	Área máxima para colheita
n_i	Coeficiente que indica o número de talhões adjacentes ao talhão i
$w(i)$	Número de talhões em $\lambda(i)$
a_i	Área do talhão i
d_j	Demanda no período j
α	Percentual de variação do volume em relação a demanda
δ_{ik}	Distância em número de arcos entre os talhões i e k
Δ_{Ano}	Distância máxima permitida (em arcos) entre dois talhões no mesmo período

TABELA 6 - SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES UTILIZADAS NO MODELO MATEMÁTICO
(conclusão)

Parâmetros	Descrição
Δ_{Consec}	Distância máxima permitida (em arcos) entre dois talhões em períodos consecutivos
V	Limite inferior para a soma do VPL ao final do HP
Variáveis de Decisão	Descrição
x_{ij}	1, se o talhão i for colhido no ano j 0, caso contrário
x_{kj}	1, se o talhão k for colhido no ano j 0, caso contrário
y_{ikj}	1, se a aresta (i, k) fizer parte da solução no ano j 0, caso contrário

FONTE: A autora (2023).

De acordo com Augustynczyk (2014), uma possível abordagem consiste na introdução de variáveis auxiliares que representam as adjacências entre dois talhões, com uma função objetivo de maximização de pares de talhões adjacentes, induzindo a agregação de áreas de colheita, conforme o modelo matemático apresentado a seguir:

$$Max A = \sum_{(i,k) \in \delta(E)} \sum_{j=1}^H y_{ikj} \quad (4.26)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^H x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.27)$$

$$x_{ij} \geq y_{ikj} \quad \forall j \in J, \forall (i, k) \in \delta(E) \quad (4.28)$$

$$x_{kj} \geq y_{ikj} \quad \forall j \in J, \forall (i, k) \in \delta(E) \quad (4.29)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq (1 + \alpha) \cdot d_j \quad \forall j \in J \quad (4.30)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq (1 - \alpha) \cdot d_j \quad \forall j \in J \quad (4.31)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^H c_{ij} x_{ij} \geq V \quad (4.32)$$

$$\delta_{ik}(x_{ij} + x_{kj} - 1) \leq \Delta_{Ano} \quad \begin{array}{l} \forall i, k \in I, \\ k > i, \forall j \in J, \end{array} \quad (4.33)$$

$$\delta_{ik}(x_{ij} + x_{k(j+1)} - 1) \leq 2\Delta_{Consec} \quad \begin{array}{l} \forall i, k \in I \\ j = 1, \dots, |J| - 1 \end{array} \quad (4.34)$$

$$\sum_{i \in \lambda(i)} x_{ij} \leq w(i) - 1 \quad \forall \lambda(i), \forall j \in J \quad (4.35)$$

$$x_{ij}, x_{kj}, y_{ikj} \in \{0,1\} \quad (4.36)$$

A função objetivo de maximização da soma de adjacências entre pares de talhões (4.26) visa promover a agregação de áreas de colheita.

O conjunto de restrições (4.27) determina que cada talhão seja colhido uma única vez durante o horizonte de planejamento. Os conjuntos de restrições (4.28) e (4.29) impõem que se uma aresta foi selecionada para fazer parte da solução em determinado ano do HP, os talhões correspondentes a esta aresta sejam colhidos neste mesmo ano (AUGUSTYNCZIK, 2014).

Os conjuntos (4.30) e (4.31) determinam o equilíbrio da produção volumétrica de madeira, com uma variação percentual (α). Foram testados cenários com $\alpha = 0,1$ e $0,15$.

A restrição (4.32) garante o limite mínimo para o VPL obtido durante o HP. Foi utilizado o valor do FO obtido na abordagem URM para o parâmetro V , que representa o valor mínimo do VPL desejado no fim do HP.

O conjunto (4.33) impõe que as distâncias em arcos entre dois talhões i e k selecionados para corte em um mesmo ano do horizonte de planejamento seja igual ou inferior a uma distância máxima determinada Δ_{Ano} . Para os dados da floresta analisada, foi estabelecida uma distância máxima de 4 arcos. As distâncias d_{ik} foram obtidas por meio do Algoritmo de Dijkstra. Segundo Augustynzik (2014), aplicação desse conjunto de restrições tem como o objetivo a redução das movimentações do maquinário entre os talhões, buscando evitar a ocorrência de talhões isolados na solução. O conjunto (4.34) visa aproximar blocos de talhões de períodos consecutivos, com o objetivo de minimizar custos de manutenção de estradas, impondo a distância máxima representada pelo parâmetro Δ_{Consec} .

As restrições (4.35) correspondem a abordagem ARM utilizando a formulação *Path*, que impede que talhões adjacentes sejam colhidos no mesmo período quando a soma de suas áreas ultrapassa a área máxima previamente determinada.

O domínio das variáveis de decisão do modelo matemático, x_{ij}, x_{kj}, y_{ikj} , é determinado em (4.36).

5 TESTES COMPUTACIONAIS

O modelo matemático e os cenários propostos foram implementados no Visual Studio 2019 em linguagem C# e resolvidos por meio do *software* Gurobi versão 9.5.0 (GUROBI OPTIMIZATION, 2021), em um computador com processador Intel® Core™ i5-1035G1, 1.00 GHz e 8.0 GB de RAM.

5.1 GERAÇÃO DE CENÁRIOS DO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DO VPL

Com base em modelos matemáticos apresentados na literatura, determinamos 18 diferentes cenários, consistindo em: cenário livre, que representa o planejamento tradicional, considerando apenas aspectos econômicos; equilíbrio da produção volumétrica de madeira; restrições URM e restrições ARM.

Para os cenários que incluem restrições ARM, foram testados diferentes limites de área e duas formulações para a formação de blocos de talhões: *Path* e *Bucket*.

Com relação a formulação *Path*, foi considerada a variação de área máxima de 40 ha, 50 ha ou 100 ha, com a possibilidade ou não de aplicação de restrições de equilíbrio na produção volumétrica, considerando a demanda constante.

Todos os cenários propostos possuem a função objetivo (FO) de maximização do VPL, mas com diferenças entre as restrições aplicadas. Os cenários testados com suas respectivas funções objetivo e restrições são descritos na TABELA 7:

TABELA 7 – CENÁRIOS TESTADOS PARA O MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DO VPL

CENÁRIO	NOME	FO	RESTRIÇÕES
1	Livre	4.1	4.2, 4.7
2	Eq. 15% DC	4.1	4.2, 4.3, 4.4, 4.7
3	Eq. 10% DC	4.1	4.2, 4.3, 4.4, 4.7
4	URM	4.1	4.2, 4.5, 4.7
5	URM + Eq. 15%	4.1	4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.7
6	URM + Eq. 10%	4.1	4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.7
7	ARM <i>Path</i> (40 ha)	4.1	4.2, 4.6, 4.7
8	ARM <i>Path</i> (40 ha) + Eq. 15%	4.1	4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7
9	ARM <i>Path</i> (40 ha) + Eq. 10%	4.1	4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7
10	ARM <i>Path</i> (50 ha)	4.1	4.2, 4.6, 4.7
11	ARM <i>Path</i> (50 ha) + Eq. 15%	4.1	4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7
12	ARM <i>Path</i> (50 ha) + Eq. 10%	4.1	4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7
13	ARM <i>Path</i> (100 ha)	4.1	4.2, 4.6, 4.7
14	ARM <i>Path</i> (100 ha) + Eq. 15%	4.1	4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7
15	ARM <i>Path</i> (100 ha) + Eq. 10%	4.1	4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7
16	ARM <i>Bucket</i>	4.8	4.9, 4.12 – 4.23, 4.25
17	ARM <i>Bucket</i> + Equilíbrio ($\alpha = 15\%$)	4.8	4.9 – 4.25
18	ARM <i>Bucket</i> + Equilíbrio ($\alpha = 10\%$)	4.8	4.9 – 4.25

FONTE: A autora (2023).

Para a aplicação das restrições ARM utilizando a abordagem *Bucket*, baseada nos modelos apresentados por Constantino, Martins e Borges (2008) e Correa e Scarpin (2020), o número máximo de blocos gerados durante cada ano do horizonte de planejamento (B) foi calculado pela divisão da área total da floresta (ou seja, a soma da área de todos os talhões) pela área máxima, arredondando o valor para obter um número inteiro, conforme a equação (5.1):

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N a_i}{A_{max}} \quad (5.1)$$

Por exemplo, ao considerar a área máxima de 200 ha, pode-se gerar até 6 blocos em cada período.

A distância entre dois talhões d_{ik} foi calculada previamente com o algoritmo de Dijkstra, que obtém a distância mínima entre dois nós, considerou-se 1 o custo entre talhões adjacentes (CORREA; SCARPIN, 2020).

De acordo com Augustynczyk (2014), o algoritmo de Dijkstra computa uma árvore de caminhos mínimos a partir de uma origem, começando com a inicialização das distâncias: a origem possui valor zero e os outros vértices possuem um valor tão grande quanto possível. Então é feito o relaxamento e se adiciona o vértice com menor distância até a origem, ainda não presente na árvore de caminho mínimo (AUGUSTYNCZYK, 2014). O processo termina quando todos os vértices são adicionados à árvore.

Considerando a floresta como um grafo direcionado para a aplicação do algoritmo, temos que cada talhão é considerado como um nó e os arcos ligam pares de talhões. Cada talhão foi utilizado como origem no algoritmo, permitindo a construção de uma matriz de distâncias mínimas, expressa em número de arcos separando os pares de talhões (AUGUSTYNCZYK, 2014).

Conforme Constantino, Martins e Borges (2008), um parâmetro importante relacionado ao impacto no tamanho do modelo na abordagem ARM é o raio dado pela equação (5.2), onde $\bar{a}$ é a área média dos talhões da floresta. Segundo os mesmos autores, na abordagem *Bucket*, o número de variáveis e restrições aumenta de forma polinomial. Foram determinados 3 cenários para teste da abordagem ARM *Bucket*, com aplicação da FO de maximização de VPL (4.8) e variações entre a área máxima e área mínima ou sem restrições de área mínima.

A TABELA 8 apresenta as 30 subdivisões dos três cenários *Bucket* para realização dos testes computacionais, com variações entre as áreas limite e demanda a ser atendida.

TABELA 8 – CENÁRIOS ARM BUCKET
(continua)

CENÁRIO	A_{min}	A_{max}	DEMANDA
16	ARM <i>Bucket</i>		
16.1	0	100	-
16.2	0	200	-
16.3	40	100	-
16.4	40	200	-
16.5	50	100	-
16.6	50	200	-
17	ARM <i>Bucket</i> + Eq. 15%		
17.1	0	100	Constante
17.2	0	200	Constante
17.3	40	100	Constante
17.4	40	200	Constante
17.5	50	100	Constante
17.6	50	200	Constante
17.7	0	100	Variável
17.8	0	200	Variável
17.9	40	100	Variável
17.10	40	200	Variável
17.11	50	100	Variável
17.12	50	200	Variável

TABELA 8 – CENÁRIOS ARM BUCKET
(conclusão)

CENÁRIO	A_{min}	A_{max}	DEMANDA
18	ARM <i>Bucket</i> + Eq. 10%		
18.1	0	100	Constante
18.2	0	200	Constante
18.3	40	100	Constante
18.4	40	200	Constante
18.5	50	100	Constante
18.6	50	200	Constante
18.7	0	100	Variável
18.8	0	200	Variável
18.9	40	100	Variável
18.10	40	200	Variável
18.11	50	100	Variável
18.12	50	200	Variável

FONTE: A autora (2023).

Nos cenários envolvendo restrições de equilíbrio na produção volumétrica, o percentual permitido para a variação do volume em relação a demanda foi de 15% ou 10%. A demanda anual poderia ser constante ou variável. Para a demanda constante, foi fixado o volume de 90.000 m³ em cada ano e para a demanda variável foram considerados os valores para cada ano do HP conforme a TABELA 9.

Os valores utilizados como parâmetro para a demanda variável foram determinados com referência no volume colhido em cada período do cenário livre.

TABELA 9 – VALORES UTILIZADOS COMO PARÂMETRO PARA DEMANDA VARIÁVEL E CONSTANTE

HP (Ano)	Demanda Variável (m³)	Demanda Constante (m³)
1	80.000	90.000
2	80.000	90.000
3	80.000	90.000
4	100.000	90.000
5	200.000	90.000

FONTE: A autora (2023).

Também foram determinados alguns cenários sem aplicação de restrições de demanda que visam menor flutuação na produção volumétrica anual, que correspondem aos conjuntos de restrições (4.10), (4.11) e (4.24).

5.2 GERAÇÃO DE CENÁRIOS DO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DE ADJACÊNCIAS ENTRE PARES DE TALHÕES

Para o modelo com função objetivo de maximização da soma de de adjacências entre pares de talhões, foram considerados os seguintes parâmetros: para as distâncias foram utilizados os valores máximos de $\Delta_{Ano} = 6$ arcos e $\Delta_{Consec} = 10$ arcos. O valor utilizado como referência do parâmetro V , que representa o limite inferior para o VPL obtido no final do horizonte de planejamento foi o VPL obtido no modelo de maximização do VPL com a aplicação das restrições da abordagem URM, de R\$ 31.618.600,86. Além disso, foi estabelecida uma variação máxima de $\alpha = 10\%$ ou $\alpha = 15\%$ na produção anual, considerando uma demanda constante de $d_j = 90.000 \text{ m}^3$. Para os cenários com a inclusão de restrição de área máxima, foram considerados os limites de 40 ha, 50 ha e 100 ha para o parâmetro A_{max} . A partir da variação da aplicação de restrições de área e volume produzido ou não, e dos valores citados para os parâmetros, foram propostos 12 cenários para a aplicação do modelo matemático, apresentados na TABELA 10:

TABELA 10 – CENÁRIOS TESTADOS PARA O MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DE ADJACÊNCIAS

CENÁRIO	NOME	FO	RESTRIÇÕES
19.1	Livre	4.26	4.27, 4.28, 4.36
19.2	Eq. 15%	4.26	4.27 – 4.31, 4.36
19.3	Eq. 10%	4.26	4.27 – 4.31, 4.36
19.4	ARM (40 ha)	4.26	4.27 – 4.29, 4.32 – 4.36
19.5	ARM (40 ha) + Eq. 15%	4.26	4.27 – 4.36
19.6	ARM (40 ha) + Eq. 10%	4.26	4.27 – 4.36
19.7	ARM (50 ha)	4.26	4.27 – 4.29, 4.32 – 4.36
19.8	ARM (50 ha) + Eq. 15%	4.26	4.27 – 4.36
19.9	ARM (50 ha) + Eq. 10%	4.26	4.27 – 4.36
19.10	ARM (100 ha)	4.26	4.27 – 4.29, 4.32 – 4.36
19.11	ARM (100 ha) + Eq. 15%	4.26	4.27 – 4.36
19.12	ARM (100 ha) + Eq. 10%	4.26	4.27 – 4.36

FONTE: A autora (2023).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos modelos matemáticos para o problema do agendamento da colheita florestal, considerando a FO de maximização do VPL da floresta ou a FO de maximização de adjacências, com a aplicação de diferentes restrições nos modelos e variações entre a área máxima permitida.

6.1 RESULTADOS DO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DO VPL

A TABELA 11 mostra os resultados da função objetivo de maximização do VPL para cada cenário testado, com a aplicação das abordagens URM e ARM *Path*, o GAP da solução obtida e o tempo de processamento.

TABELA 11 – RESULTADOS DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA OS CENÁRIOS LIVRE, URM E ARM PATH

(continua)

CENÁRIO	NOME	FO - VPL (R\$)	GAP (%)	TEMPO (s)
1	Livre	R\$ 31.742.015,95	0	0,044
2	Eq. 15%	R\$ 31.673.448,11	0,0016	0,186
3	Eq. 10%	R\$ 31.668.333,56	0,0019	0,02
4	URM	R\$ 31.618.600,86	0,0031	0,26
5	URM + Eq. 15%	R\$ 31.596.654,38	0,0097	0,34
6	URM + Eq. 10%	R\$ 31.586.990,64	0,0056	0,53
7	ARM <i>Path</i> (40 ha)	R\$ 31.718.721,70	0,0075	7.637,85
8	ARM <i>Path</i> (40 ha) + Eq. 15%	R\$ 31.673.534,85	0,0012	6.456,41
9	ARM <i>Path</i> (40 ha) + Eq. 10%	R\$ 31.668.486,24	0,0013	7.214,96
10	ARM <i>Path</i> (50 ha)	R\$ 31.723.623,00	0,0076	7.001,89
11	ARM <i>Path</i> (50 ha) + Eq. 15%	R\$ 31.673.347,27	0,0018	6.376,29
12	ARM <i>Path</i> (50 ha) + Eq. 10%	R\$ 31.668.325,82	0,0018	6.684,31

TABELA 11 – RESULTADOS DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA OS CENÁRIOS LIVRE, URM E ARM PATH

(conclusão)

CENÁRIO	NOME	FO - VPL (R\$)	GAP (%)	TEMPO (s)
13	ARM Path (100 ha)	R\$ 31.738.873,04	0,0071	4.930,13
14	ARM Path (100 ha) + Eq. 15%	R\$ 31.673.207,15	0,0023	5.577,52
15	ARM Path (100 ha) + Eq. 10%	R\$ 31.668.684,40	0,0007	4.207,40

FONTE: A autora (2023).

Na TABELA 12, são apresentados os resultados da função objetivo nos cenários da abordagem ARM com o algoritmo *Path*, utilizando diferentes quantidades de talhões para a geração dos blocos que excedem a área limite que compõem as restrições do modelo matemático.

TABELA 12 – RESULTADOS DOS CENÁRIOS ARM 40 UTILIZANDO O ALGORITMO PATH

CENÁRIO	BLOCOS	FO - VPL (R\$)	GAP (%)	TEMPO (s)	RESTRIÇÕES
ARM 40 (Path)	Até 2 talhões	R\$ 31.734.148,47	0	0,39	185
ARM 40 (Path)	Até 3 talhões	R\$ 31.718.625,23	0,0046	0,25	46.295
ARM 40 (Path)	Até 4 talhões	R\$ 31.718.721,70	0,0076	0,15	49.410
ARM 40 (Path)	Até 5 talhões	R\$ 31.718.721,70	0,0076	6,6	57.740
ARM 40 (Path)	Até 6 talhões	R\$ 31.718.721,70	0,0076	116,44	77.030
ARM 40 (Path)	Até 7 talhões	R\$ 31.716.822,55	0,0093	1.781,91	117.840
ARM 40 (Path)	Até 8 talhões	R\$ 31.718.721,70	0,0075	7.637,85	202.045

FONTE: A autora (2023).

O número de restrições aumentou consideravelmente conforme o aumento da quantidade de talhões considerada na criação de blocos que excedem a área máxima determinada e não devem ser colhidos no mesmo período. Para a área máxima de 40 ha com restrições de blocos formados por até 8 blocos de talhões adjacentes que excedem a área, o modelo matemático possui 202.045 restrições para os dados analisados.

Os resultados da otimização em termos da produção volumétrica de madeira total em todos os cenários e variações em relação ao cenário Livre são apresentados na TABELA 13:

TABELA 13 – VOLUME TOTAL DA COLHEITA NAS ABORDAGENS URM E ARM PATH E COMPARAÇÃO EM RELAÇÃO AO CENÁRIO LIVRE

CENÁRIO	NOME	PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA (m^3)	VARIAÇÃO (%)
1	Livre	501.393,99	-
2	Eq. 15%	467.617,80	-6,74
3	Eq. 10%	464.355,36	-7,39
4	URM	477.731,46	-4,72
5	URM + Eq. 15%	466.584,39	-6,94
6	URM + Eq. 10%	464.355,36	-7,39
7	ARM <i>Path</i> (40 ha)	489.783,10	-2,32
8	ARM <i>Path</i> (40 ha) + Eq. 15%	467.738,88	-6,71
9	ARM <i>Path</i> (40 ha) + Eq. 10%	465.209,45	-7,22
10	ARM <i>Path</i> (50 ha)	492.297,36	-1,81
11	ARM <i>Path</i> (50 ha) + Eq. 15%	467.615,73	-6,74
12	ARM <i>Path</i> (50 ha) + Eq. 10%	465.206,04	-7,22
13	ARM <i>Path</i> (100 ha)	499.455,30	-0,39
14	ARM <i>Path</i> (100 ha) + Eq. 15%	467.484,10	-6,76
15	ARM <i>Path</i> (100 ha) + Eq. 10%	465.278,07	-7,20

FONTE: A autora (2023).

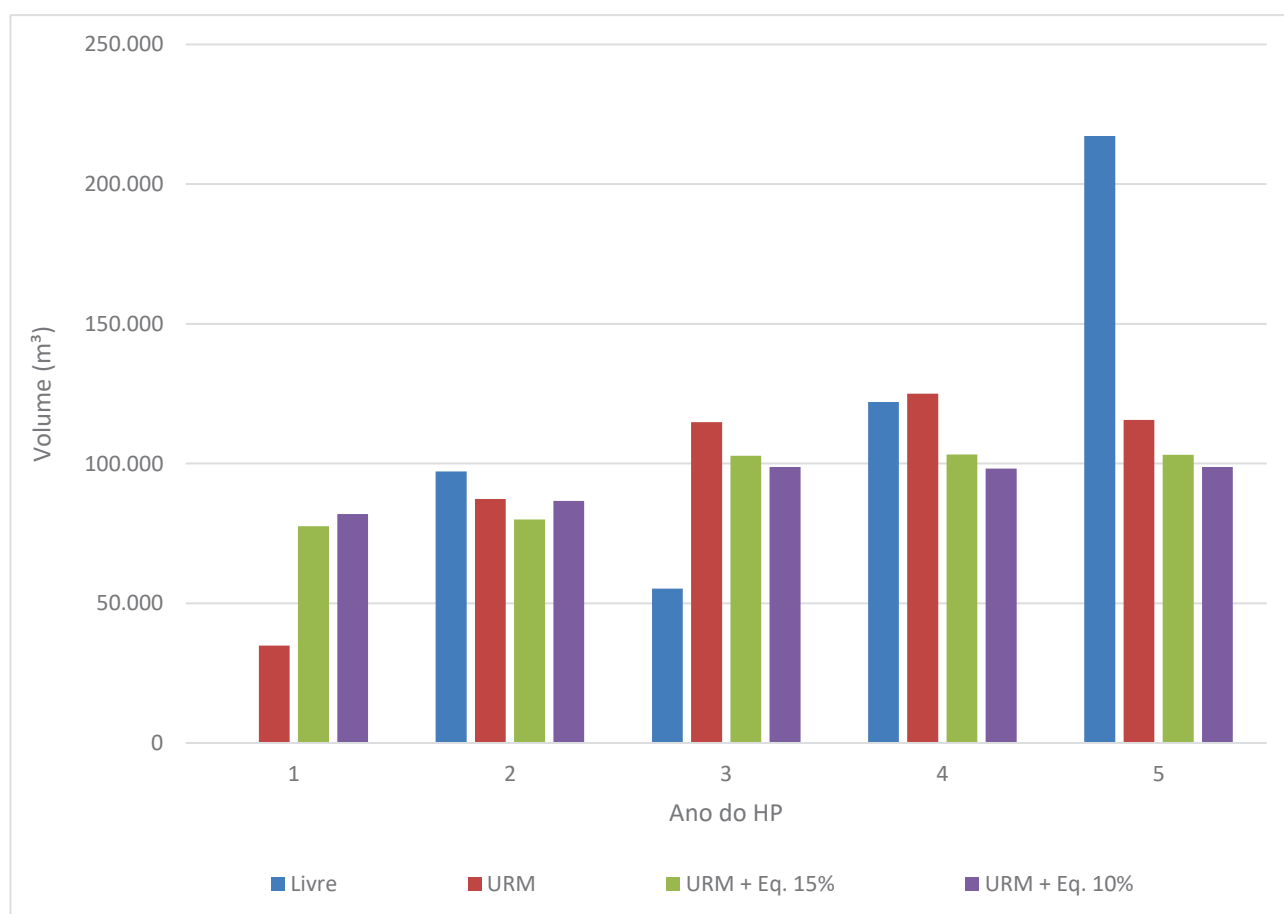
O aumento no limite de área promove maior liberdade de colheita de talhões, influenciando no volume colhido em cada cenário: para 40 ha, o volume total colhido foi de 489.783,10 m^3 . Fixando o limite de área em 50 ha, a produção de madeira durante o HP aumentou para 492.297,36 m^3 .

O crescimento na produção volumétrica de madeira gerou o aumento do valor da função objetivo no final do HP. Para o cenário com limite de blocos de talhões até

40 ha, o valor obtido para a função objetivo foi de R\$ 31.718.721,70. Já para o limite de área de 50 ha na mesma abordagem, o resultado foi R\$ 31.723.623,00, refletindo um aumento de aproximadamente 0,015% no VPL por conta do aumento de área máxima permitida.

A FIGURA 7 apresenta as produções volumétricas em cada período do HP, nos cenários Livre e URM, sem limites de área e equilíbrio em comparação com a incorporação da abordagem URM com restrições de variação na produção volumétrica com referência a uma demanda constante em todos os anos do HP. Pode-se observar que as restrições de equilíbrio foram atendidas, resultando no volume produzido com variações inferiores a 10% ou 15% com referência a uma demanda constante determinada.

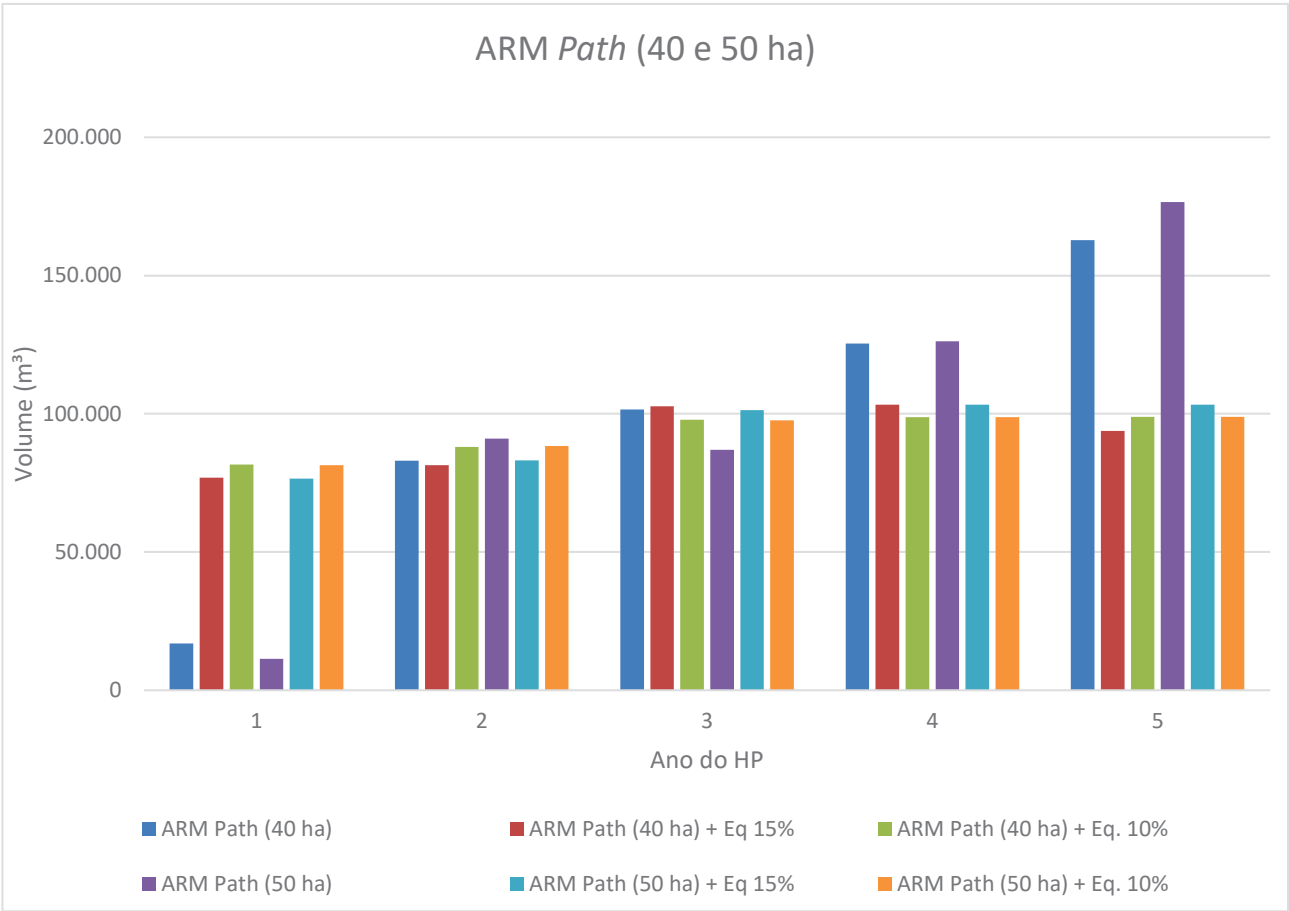
FIGURA 7 – PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA ANUAL NOS CENÁRIOS LIVRE E URM COM E SEM RESTRIÇÕES DE EQUILÍBRIO



FONTE: A autora (2023)

Da mesma forma, a FIGURA 8 exibe o volume produzido em cada um dos cinco anos do HP com a abordagem ARM usando a formulação *Path*, utilizando os limites de área de 40 ha e 50 ha, com e sem a aplicação de restrições de variação na produção volumétrica com referência a demanda constante. Os resultados mostram que a aplicação de restrições de equilíbrio evita grandes flutuações no suprimento de madeira ao longo dos períodos do HP.

FIGURA 8 – PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA ANUAL DA ABORDAGEM ARM PATH (40 E 50 HA)



FONTE: A autora (2023).

A TABELA 14 contém os resultados do volume produzido com a aplicação do modelo ARM *Path* em cada período do horizonte de planejamento e a produção total, que cresce com o aumento da área máxima permitida para colheita.

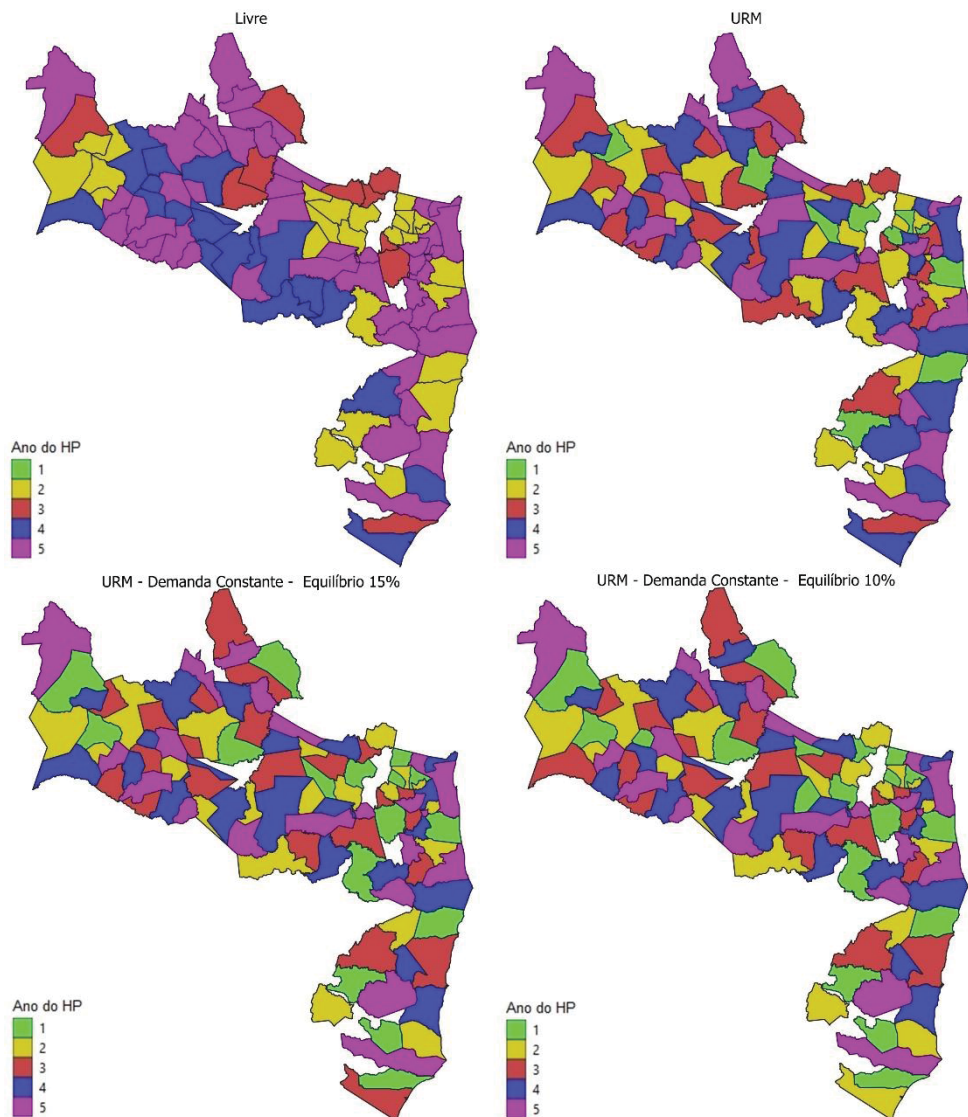
TABELA 14 – PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA DE MADEIRA COM A APLICAÇÃO DA ABORDAGEM ARM PATH

ARM <i>Path</i>	PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA (m^3)	
PERÍODO (ANO)	40 ha	50 ha
1	16.880,53	11.408,97
2	83.050,93	91.071,51
3	101.535,81	86.987,08
4	125.461,07	126.214,12
5	162.854,76	176.615,68
TOTAL	489.783,10	492.297,36

FONTE: A autora (2023).

Com relação a configuração espacial dos talhões selecionados durante o horizonte de planejamento, na FIGURA 9 são apresentados os resultados do planejamento da colheita nos cenários Livre, que considera apenas restrições econômicas, e URM, onde também são considerados aspectos ambientais. Pode-se concluir que talhões adjacentes não foram colhidos no mesmo período do HP quando a abordagem URM foi aplicada.

FIGURA 9 – CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DOS TALHÕES SELECIONADOS PARA COLHEITA NOS CENÁRIOS LIVRE E URM

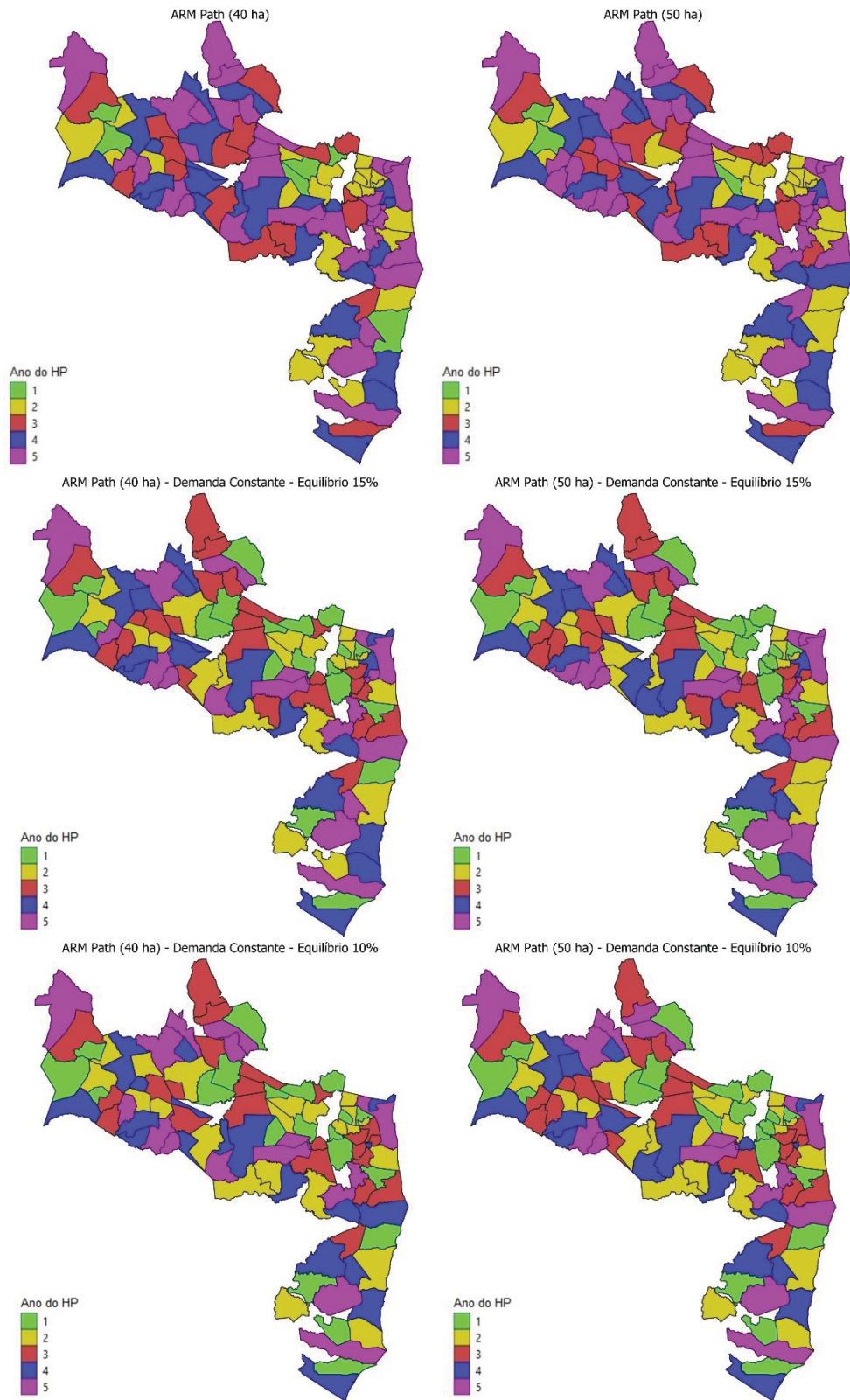


FONTE: A autora (2023).

A FIGURA 10 mostra os talhões selecionados para colheita na abordagem ARM utilizando o algoritmo *Path*, considerando as áreas limites de 40 ha e 50 ha. Na FIGURA 11 são apresentados os resultados para a área limite de 100 ha.

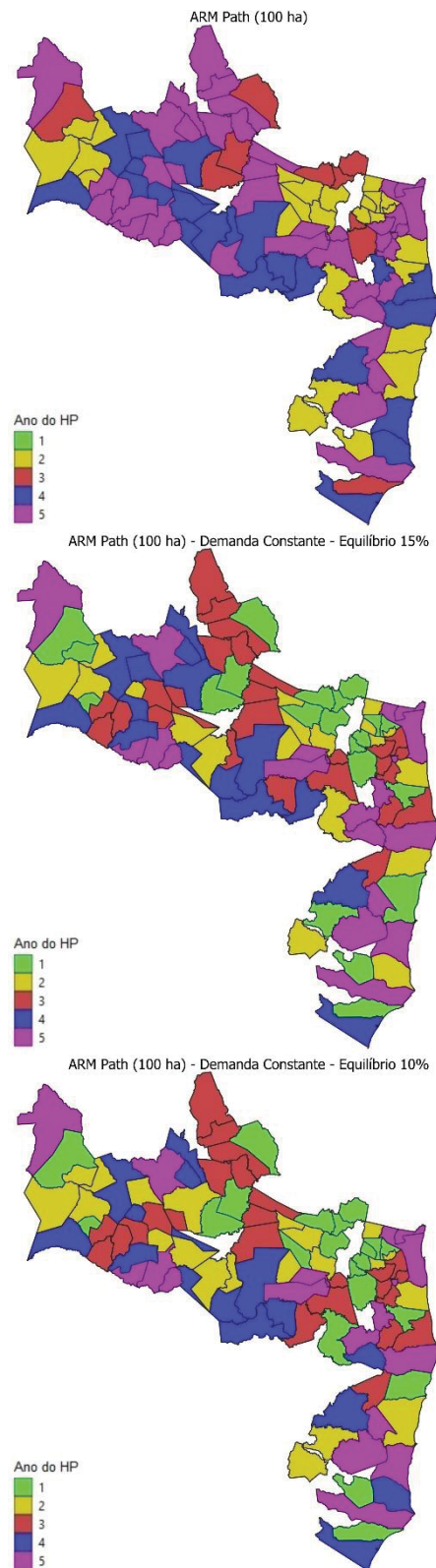
Pela distribuição espacial dos talhões colhidos em cada ano do HP, pode-se concluir que as restrições de adjacência ocasionaram a formação blocos de talhões respeitando a área máxima determinada.

FIGURA 10 – AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA NOS CENÁRIOS COM APLICAÇÃO DA ABORDAGEM ARM PATH (40 E 50 HA)



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 11 – AGENDAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA NOS CENÁRIOS COM APLICAÇÃO DA ABORDAGEM ARM PATH (100 HA)



FONTE: A autora (2023).

Considerando os cenários em que a restrição de adjacência do tipo URM foi aplicada, os resultados mostraram que as restrições foram satisfeitas, pois talhões contíguos não foram selecionados para a colheita no mesmo ano do HP. Além disso, as restrições URM causaram uma dispersão na colheita dos talhões por conta da restrição de colheita de quaisquer pares de talhões adjacentes no mesmo período nesta abordagem. A abordagem URM é eficiente quando o objetivo é apenas a diminuição da extensão da colheita, atendendo aspectos ambientais. Por outro lado, torna-se necessária uma maior movimentação das máquinas florestais entre os talhões, aumentando os custos da colheita (AUGUSTYNCZIK *et al.*, 2015) e, assim, influenciando nos gastos operacionais da colheita e de construção e manutenção de estradas ao longo do HP.

Além disso, a modelagem URM pode ser prejudicial na manutenção do fluxo de madeira ao longo do HP, já que talhões vizinhos podem apresentar estoques substancialmente distintos (AUGUSTYNCZIK *et al.*, 2015).

Segundo Sfeir *et al.* (2020) a preferência por modelos com abordagem ARM frente aos modelos URM ocorre por conta da flexibilidade alcançada nesse tipo de abordagem, pois é permitido que talhões vizinhos sejam colhidos no mesmo período, desde que a soma da área destes não seja maior do que a área limite imposta no modelo. De acordo com Augustynczik (2014), um benefício da formação de blocos de talhões para colheita é ocasionar menor movimentação de máquinas entre os talhões, reduzindo custos da operação de colheita.

Para McDill, Rebain e Braze (2002), um dos parâmetros que podem afetar a eficiência das formulações ARM é a área máxima de colheita permitida. Segundo os autores, o número de combinações de talhões adjacentes que podem ser selecionados para corte no mesmo período influencia no tamanho do modelo matemático, o que foi verificado nos resultados do presente estudo. Para verificar o impacto do parâmetro no tamanho do modelo e tempo de solução, modelos foram criados utilizando limites de área diferentes: 40 ha e 50 ha.

Pode-se concluir que o aumento da área permitida promove maior liberdade para seleção de talhões na formação de blocos de colheita, resultando em maiores valores na função objetivo de maximização do VPL.

Na abordagem ARM, nos cenários com a aplicação do modelo baseado na formulação *Bucket*, proposta por Constantino, Martins e Borges (2008), com a inclusão de desigualdades válidas segundo Correa (2020), ocorreu a seleção de

talhões adjacentes para corte no mesmo período do HP, favorecendo a formação de blocos.

Quando o limite de área máxima dos blocos foi aumentado, a função objetivo se aproximou mais do resultado obtido no cenário Livre (Cenário 1), que representa o agendamento da colheita tradicional, considerando apenas questões econômicas, sem quaisquer imposições de área máxima ou mínima e distância máxima entre talhões.

Na aplicação da formulação *Bucket*, ocorreu a agregação de talhões resultando em blocos maiores quando comparados a formulação *ARM Path*, por conta da adição de restrições de área mínima na formação de blocos de talhões adjacentes e também pela imposição de distância máxima entre talhões para agregação, entre blocos formados no mesmo período e distância entre blocos durante períodos consecutivos. O tempo de execução variou entre 7,76 e cerca de 3.600 segundos (1 hora), tempo limite de processamento. Os resultados são mostrados na TABELA 15.

TABELA 15 – RESULTADOS ARM BUCKET

(continua)

CENÁRIO	FO (R\$)	GAP (%)	TEMPO (s)	VARIÁVEIS	RESTRIÇÕES
16 ARM Bucket					
16.1	R\$ 31.703.233,41	0,0000	59,01	6.060	670.815
16.2	R\$ 31.699.298,36	0,0084	7,76	3.030	268.119
16.3	R\$ 31.698.865,93	0,0055	29,84	6.060	670.815
16.4	R\$ 31.695.676,68	0,0099	45,09	3.030	268.119
16.5	R\$ 31.687.187,61	0,0115	1.802,30	6.060	670.815
16.6	R\$ 31.687.872,85	0,0098	550,61	3.030	268.119
17 ARM Bucket + Eq. 15%					
17.1	R\$ 31.665.820,89	0,0099	1.614,61	6.060	670.880
17.2	R\$ 31.665.794,79	0,0084	505,69	3.030	268.154
17.3	R\$ 31.663.169,54	0,0180	3.602,55	6.060	670.880
17.4	R\$ 31.663.445,01	0,0099	2.874,29	3.030	268.154

TABELA 15 – RESULTADOS ARM BUCKET
(conclusão)

CENÁRIO	FO (R\$)	GAP (%)	TEMPO (s)	VARIÁVEIS	RESTRIÇÕES
17.5	R\$ 31.642.590,54	0,0817	3.370,35	6.060	670.880
17.6	R\$ 31.642.590,54	0,0812	3.605,06	3.030	268.154
17.7	R\$ 31.692.534,15	0,0083	36,92	6.060	670.880
17.8	R\$ 31.691.386,29	0,0097	14,97	3.030	268.154
17.9	R\$ 31.680.579,62	0,0406	3.601,99	6.060	670.880
17.10	R\$ 31.680.579,62	0,0337	3.600,12	3.030	268.154
17.11	R\$ 31.660.577,57	0,0886	3.601,67	6.060	670.880
17.12	R\$ 31.662.568,69	0,0568	3.601,09	3.030	268.154
18	ARM Bucket + Eq. 10%				
18.1	R\$ 31.661.222,40	0,0086	319,37	6.060	670.880
18.2	R\$ 31.661.222,40	0,0097	52,70	3.030	268.154
18.3	*	-	3.600,00	-	-
18.4	R\$ 31.660.988,47	0,0059	725,32	3.030	268.154
18.5	*	-	3.600,00	-	-
18.6	31635323,95	0,0840	3.601,02	3.030	268.154
18.7-18.12	infactível	-	-	-	-

FONTE: A autora (2023).

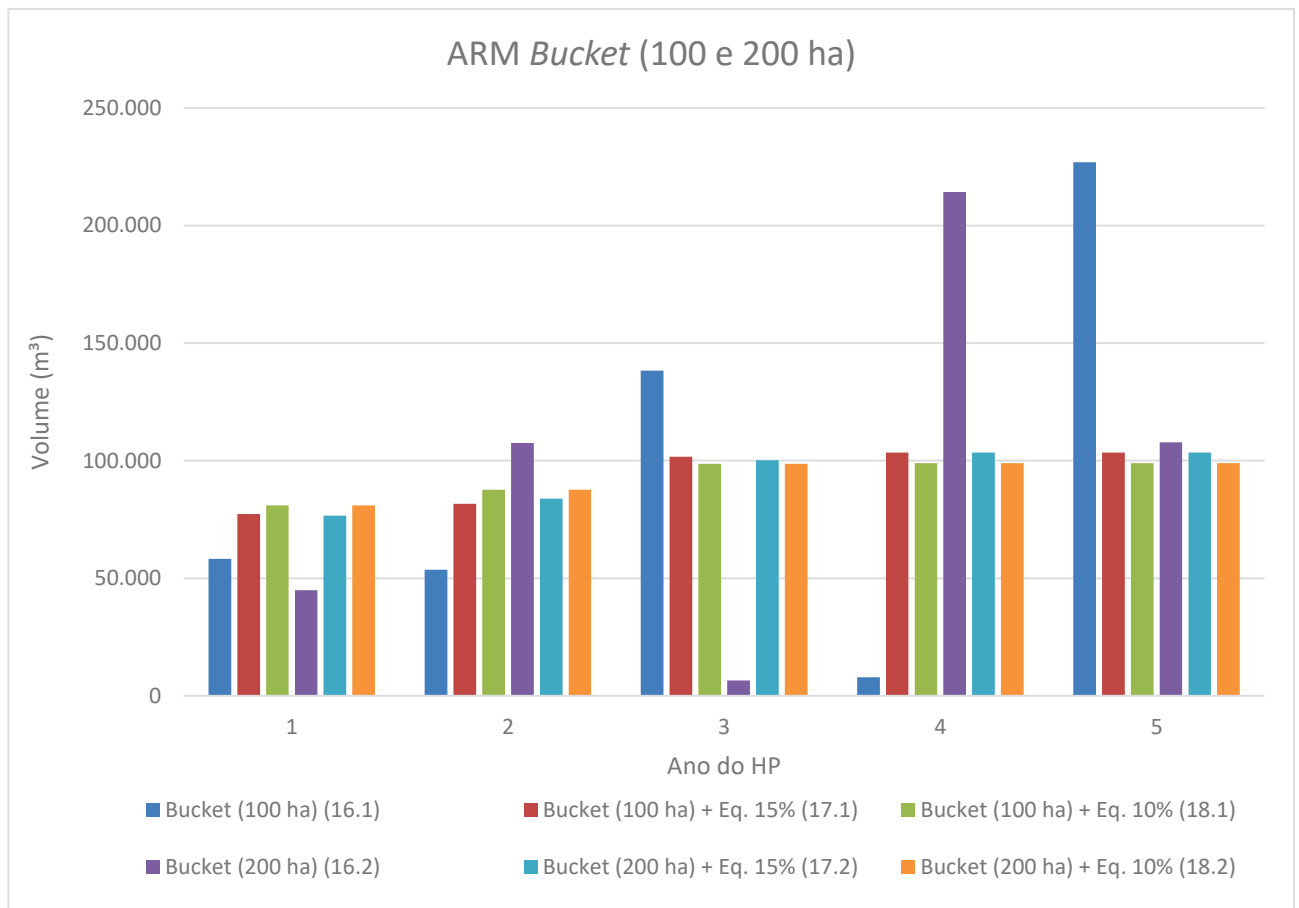
NOTA: * significa que não foram obtidas soluções em 3.600 segundos de processamento, não garantindo que o modelo é factível ou infactível para o cenário em questão.

Além disso, nos cenários em que restrições na produção volumétrica para atender a demanda foram respeitadas, tanto na abordagem URM, quanto na ARM, considerando demanda constante com variação de até 15% ou 10% no volume produzido.

Ao considerar a demanda variável, a restrição foi atendida com a variação de 15%, mas por conta dos dados analisados, o modelo tornou-se infactível ao aplicar o percentual de variação de 10%, em ambas formulações ARM.

A FIGURA 12 exibe os resultados do modelo *Bucket* sem área mínima e considerando os limites de área máxima 100 ha e 200 ha, correspondentes aos cenários 16.1 e 16.2, em termos de produção anual e cenários 17.1, 17.2, 18.1 e 18.2 que correspondem aos cenários com restrição de equilíbrio na produção volumétrica.

FIGURA 12 – VOLUME ANUAL DE COLHEITA PARA OS CENÁRIOS ARM BUCKET (100 E 200 HA)



FONTE: A autora (2023).

A seguir, são apresentadas as configurações espaciais dos resultados da aplicação do modelo *Bucket* com desigualdades válidas, sendo a FIGURA 13 referente aos cenários 16.1 até 16.6.

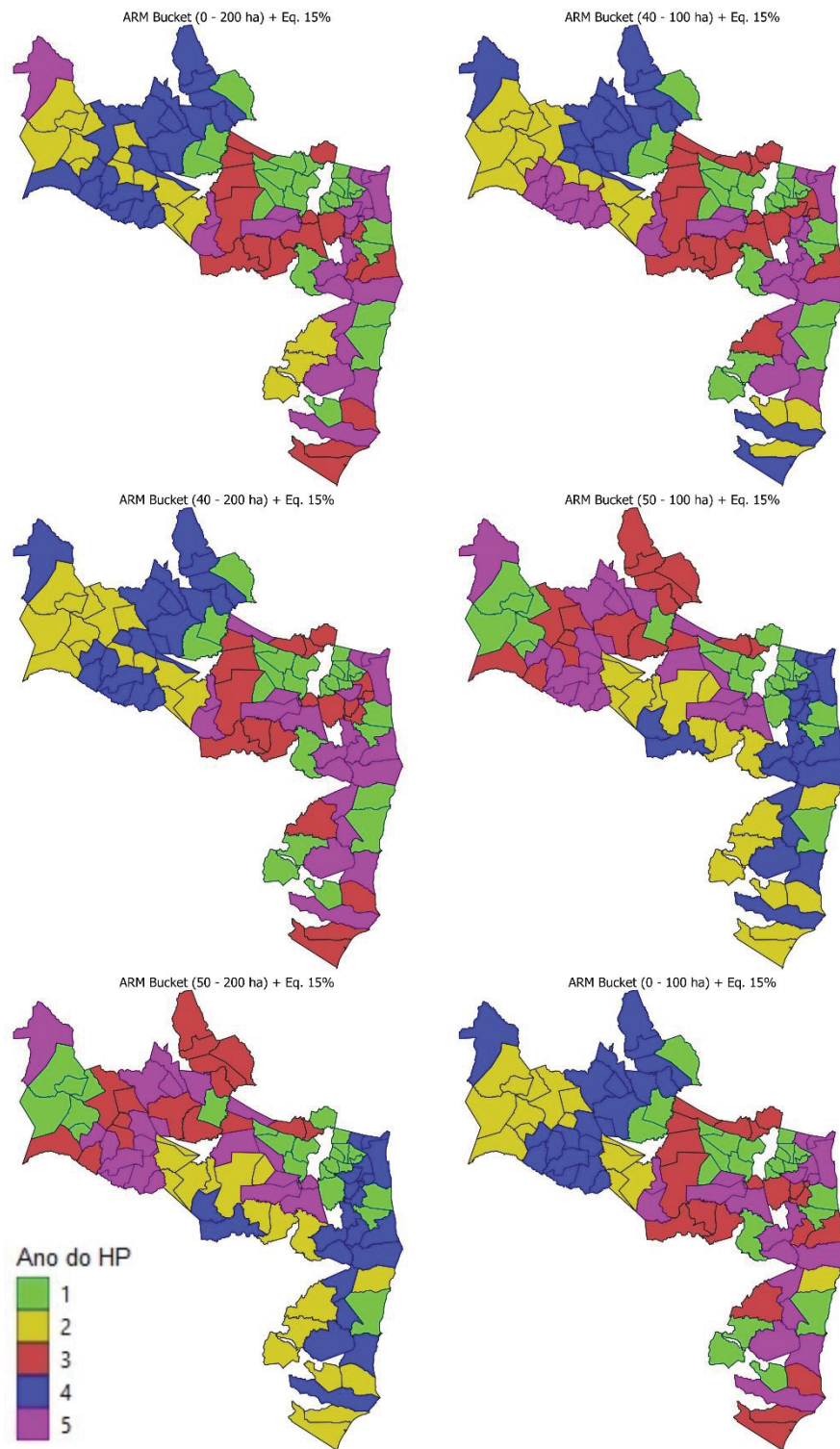
FIGURA 13 – RESULTADOS DO CENÁRIO 16 (ARM BUCKET)



FONTE: A autora (2023).

A FIGURA 14 exibe os cenários ARM *Bucket* com desigualdades válidas considerando a variação máxima de 15% no volume produzido para atender a demanda constante de 90.000 m³ por período, se tratando dos cenários 17.1 até 17.6.

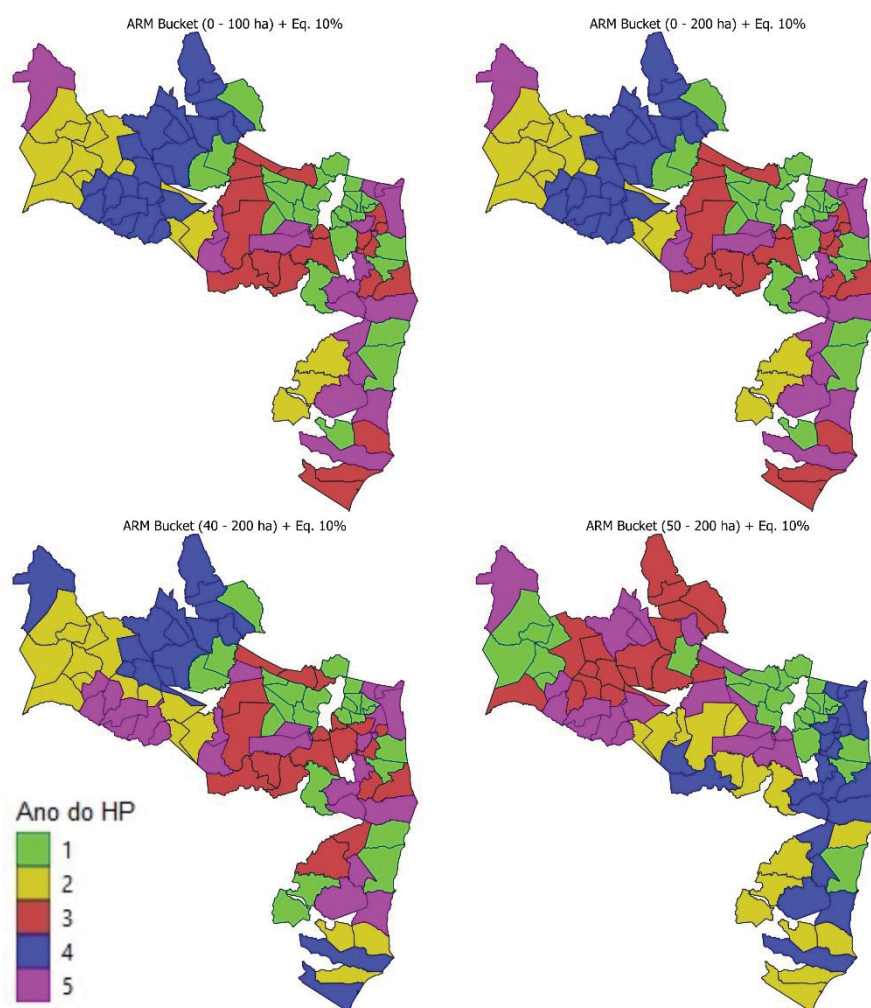
FIGURA 14 – RESULTADOS DO CENÁRIO 17 (ARM BUCKET)



FONTE: A autora (2023).

Por fim, a FIGURA 15 mostra os resultados dos cenários ARM *Bucket* com equilíbrio de 10%, 18.1 até 18.6.

FIGURA 15 – RESULTADOS DO CENÁRIO 18 (ARM BUCKET)



FONTE: A autora (2023).

A TABELA 16 apresenta os resultados do VPL e volume total produzido para os cenários 16, 17 e 18 em suas subdivisões e variações em relação ao cenário Livre (sem restrições de área ou equilíbrio), tomando como referência os valores de R\$ 31.742.015,95 para o VPL e 501.393,99 m³ para a produção. A maior queda no VPL em relação ao cenário Livre foi de 0,35%, enquanto a produção volumétrica teve a maior redução de 7,45%, no cenário 18.6, que considera área mínima de 50 ha, área máxima de 200 ha com restrições de equilíbrio segundo demanda constante.

TABELA 16 – VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DO VPL E VOLUME PRODUZIDO DO MODELO ARM BUCKET EM RELAÇÃO AO CENÁRIO LIVRE

(continua)

CENÁRIO	VPL (R\$)	VARIAÇÃO (%)	PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA (m³)	VARIAÇÃO (%)
16	ARM Bucket			
16.1	R\$ 31.703.233,41	-0,12	485.084,04	-3,25
16.2	R\$ 31.699.298,36	-0,13	481.027,93	-4,06
16.3	R\$ 31.698.865,93	-0,14	483.019,19	-3,66
16.4	R\$ 31.695.676,68	-0,15	481.290,44	-4,01
16.5	R\$ 31.687.187,61	-0,17	482.345,40	-3,80
16.6	R\$ 31.687.872,85	-0,17	478.358,44	-4,59
17	ARM Bucket + Eq. 15%			
17.1	R\$ 31.665.820,89	-0,24	467.534,32	-6,75
17.2	R\$ 31.665.794,79	-0,24	467.475,44	-6,76
17.3	R\$ 31.663.169,54	-0,25	466.135,56	-7,03
17.4	R\$ 31.663.445,01	-0,25	466.560,74	-6,95
17.5	R\$ 31.642.590,54	-0,31	465.097,09	-7,24
17.6	R\$ 31.642.590,54	-0,31	465.097,09	-7,24
17.7	R\$ 31.692.534,15	-0,16	481.324,82	-4,00
17.8	R\$ 31.691.386,29	-0,16	480.702,31	-4,13
17.9	R\$ 31.680.579,62	-0,19	478.958,05	-4,47
17.10	R\$ 31.680.579,62	-0,19	478.958,05	-4,47
17.11	R\$ 31.660.577,57	-0,26	480.230,85	-4,22
17.12	R\$ 31.662.568,69	-0,25	477.552,89	-4,75

TABELA 16 – VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DO VPL E VOLUME PRODUZIDO DO MODELO ARM BUCKET EM RELAÇÃO AO CENÁRIO LIVRE

(conclusão)

CENÁRIO	VPL (R\$)	VARIAÇÃO (%)	PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA (m³)	VARIAÇÃO (%)
18	ARM <i>Bucket</i> + Eq. 10%			
18.1	R\$ 31.661.222,40	-0,25	465.241,43	-7,21
18.2	R\$ 31.661.222,40	-0,25	465.241,43	-7,21
18.3	*	-	-	-
18.4	R\$ 31.660.988,47	-0,26	465.036,25	-7,25
18.5	*	-	-	-
18.6	R\$ 31.635.323,95	-0,34	464.029,66	-7,45
18.7 - 18.12	infactível	-	-	-

FONTE: A autora (2023).

NOTA: * significa que não foram obtidas soluções em 3.600 segundos de processamento, não garantindo que o modelo é factível ou infactível para o cenário em questão.

6.2 RESULTADOS DO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DE ADJACÊNCIAS ENTRE PARES DE TALHÕES

A TABELA 17 mostra os resultados da função objetivo e VPL obtido em cada cenário proposto para a aplicação do modelo matemático de maximização de adjacências entre pares de talhões.

TABELA 17 – RESULTADOS DO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DE ADJACÊNCIAS

CENÁRIO	VPL (R\$)	α (%)	FO	VOLUME COLHIDO (m³)	A_{max}	TEMPO (s)
19.1	31.620.372,78	-	394	483.458,12	-	0,31
19.2	31.623.901,17	15	336	466.951,94	-	5,73
19.3	31.619.498,18	10	324	463.708,80	-	18,63
19.4	31.620.619,49	-	226	479.237,14	40	3.356,32
19.5	31.620.527,34	15	216	466.146,55	40	2.834,95
19.6	31.621.449,40	10	212	464.327,43	40	2.753,19
19.7	31.623.256,37	-	266	479.947,36	50	2.948,20
19.8	31.619.540,70	15	254	466.948,49	50	2.092,92
19.9	31.621.050,43	10	250	464.304,30	50	2.639,07
19.10	31.621.187,05	-	366	478.566,85	100	868,68
19.11	31.620.182,87	15	326	466.870,63	100	919,76
19.12	31.619.036,57	10	320	464.772,41	100	1.478,66

FONTE: A autora (2023).

Em todos os cenários, o GAP foi de 0%, o que significa que a solução ótima foi obtida. Foram testados cenários com e sem restrições de equilíbrio, considerando variações de 10% e 15% permitidas na produção volumétrica de madeira, com referência a demanda previamente determinada. Os parâmetros utilizados possuem os mesmos valores de referência do modelo de maximização do VPL, apresentados no capítulo (5.1).

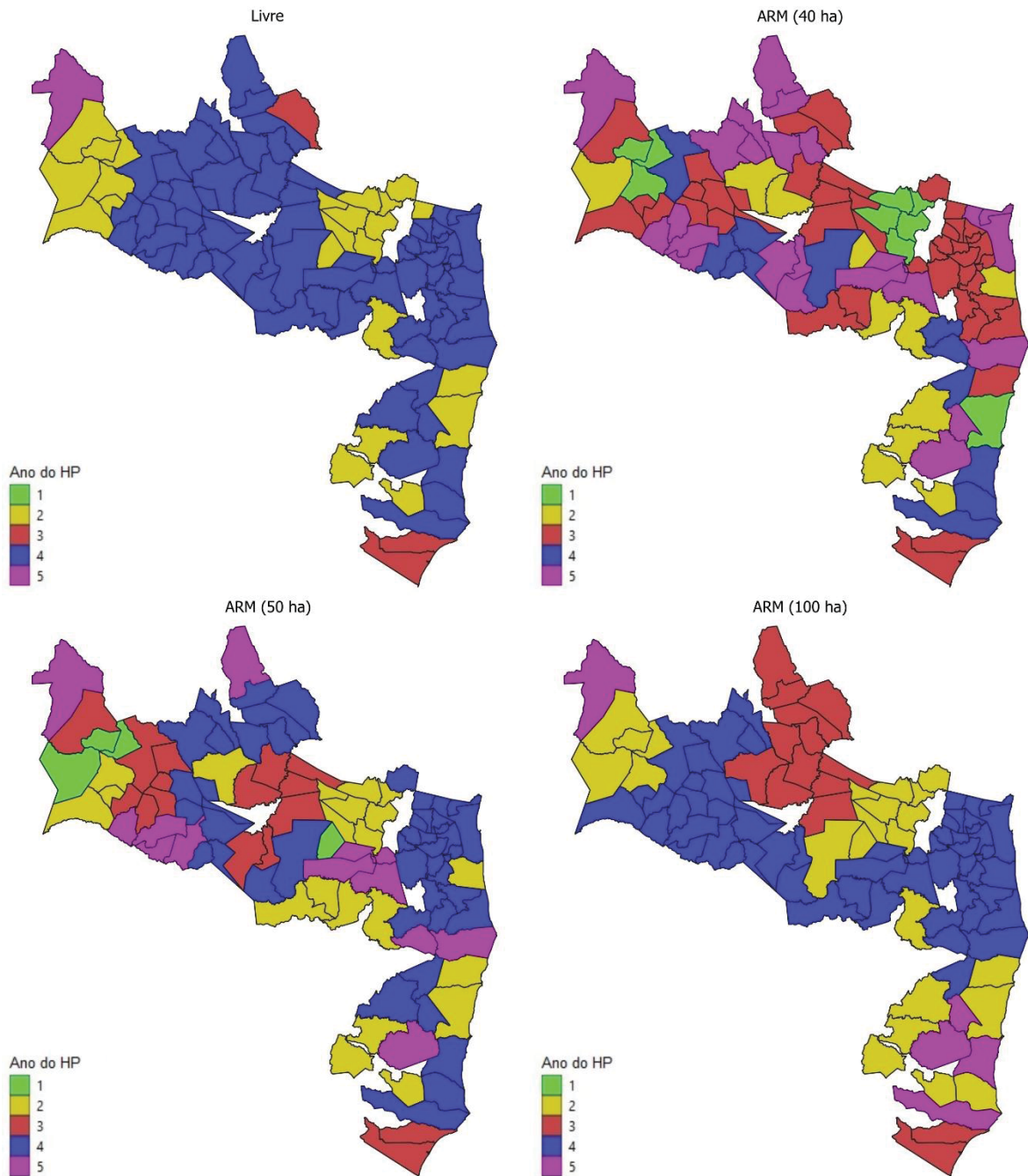
O tempo de execução ficou abaixo de 20 segundos nos cenários sem imposição de área máxima de colheita de talhões adjacentes no mesmo período do HP. O cenário 1 resultou no maior valor da função objetivo de maximização soma de arestas entre talhões adjacentes, 394. Porém, analisando com relação aos aspectos econômicos, quanto ao VPL final obtido, o cenário 2 apresentou o maior resultado.

Quando o limite de área máxima foi adicionado, o modelo demandou até cerca de 3.400 segundos para encontrar a solução ótima.

Como o valor da FO de maximização da soma de arestas entre talhões adjacentes não necessariamente implica em um maior valor do VPL obtido da colheita dos talhões ao final do horizonte de planejamento, a função objetivo de maximização da agregação em blocos torna-se mais interessante para os objetivos do planejamento florestal em nível operacional, pois proporciona menor movimentação de máquinas entre talhões e reduz os custos necessários para construção e manutenção de estradas.

A FIGURA 16 apresenta a configuração espacial dos talhões selecionados para colheita nos cenários sem restrições de variação na produção volumétrica. Pode-se observar que no cenário Livre, sem aplicação de restrições de área ou produção volumétrica, nenhum talhão foi selecionado para colheita no primeiro período e houve maior volume colhido no quarto ano do HP, ocasionando uma grande flutuação na produção anual. Nos cenários com restrições de área, porém sem especificar a demanda a ser atendida, o modelo gerou pouco ou nenhum volume colhido no primeiro ano do HP.

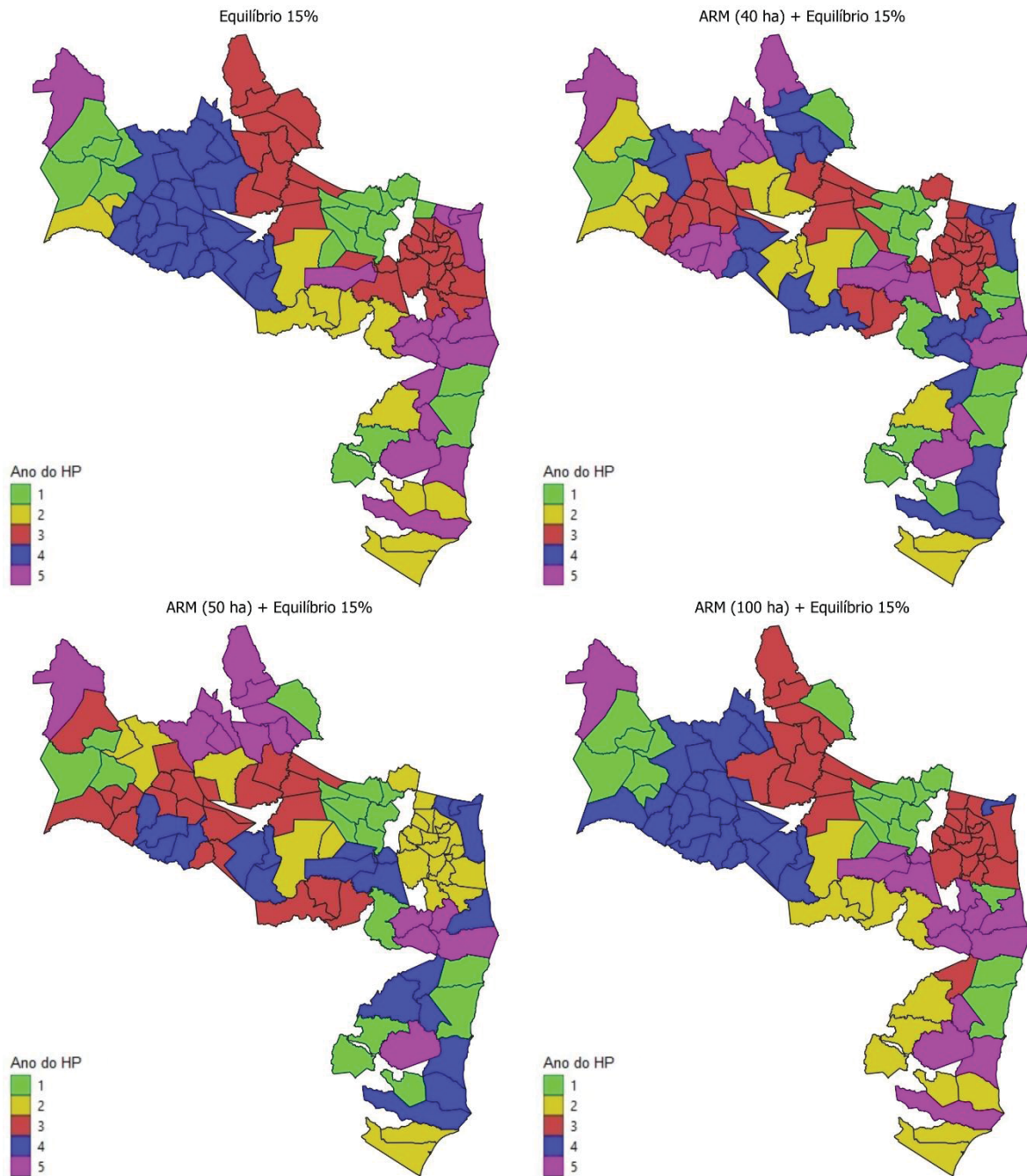
FIGURA 16 – CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DOS TALHÕES NO MODELO DE MAXIMIZAÇÃO DE ADJACÊNCIA SEM RESTRIÇÕES NA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA



FONTE: A autora (2023).

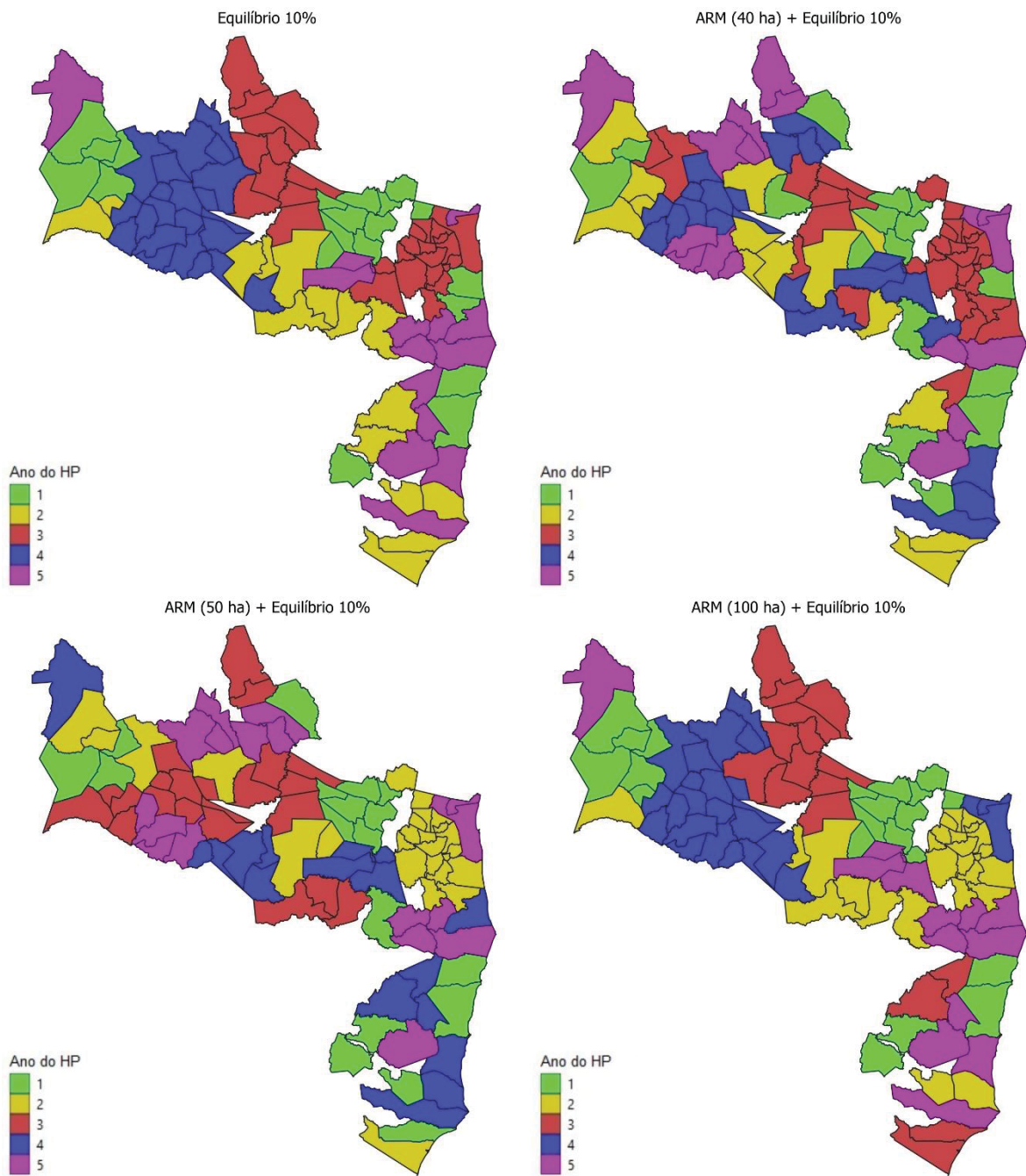
Quanto as restrições de equilíbrio na produção volumétrica são impostas, esse problema é solucionado, atendendo a demanda determinada, conforme a FIGURA 17, que mostra os resultados quando é permitida uma variação de 15% e a FIGURA 18, que apresenta a configuração espacial dos talhões com a variação máxima de 10%.

FIGURA 17 – ESPACIALIZAÇÃO DOS TALHÕES SELECIONADOS PARA COLHEITA COM VARIAÇÃO DE 15% NO VOLUME ANUAL PRODUZIDO



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 18 – CONFIGURAÇÃO DOS TALHÕES SELECIONADOS PARA COLHEITA COM VARIAÇÃO DE 10% NO VOLUME ANUAL PRODUZIDO



FONTE: A autora (2023).

Além disso, pode-se constatar, de forma geral, que os blocos se tornam maiores a medida que o limite de área máxima é aumentado em cada cenário, sendo um aspecto positivo por conta da redução de custos de manutenção e abertura de estradas para obter acesso aos talhões selecionados para corte.

7 CONCLUSÕES

A inclusão de restrições espaciais de adjacência aumenta a complexidade do modelo matemático de agendamento da colheita florestal, demandando maior tempo computacional para resolução, por consequência do aumento do número de restrições e variáveis.

Pode-se concluir que ambas as abordagens, URM e ARM, são eficientes para considerar restrições ambientais no modelo matemático para o planejamento da colheita florestal.

O QUADRO 2 apresenta de forma resumida os resultados de todos os modelos testados, considerando as maiores reduções no volume de madeira produzido, a diminuição do VPL e ao tempo computacional em segundos em comparação ao cenário Livre:

QUADRO 2 – COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS TESTADOS EM RELAÇÃO AO CENÁRIO LIVRE

MAIORES REDUÇÕES NO VOLUME DE MADEIRA PRODUZIDO	DIMINUIÇÃO DO VPL	MAIORES TEMPOS COMPUTACIONAIS
• URM: queda de 7,39% na produção total • ARM <i>Path</i>: maior redução de 7,22% • ARM <i>Bucket</i>: 7,45% • Max. Adjacências + ARM <i>Path</i>: 7,52%	• URM: até 0,49% • ARM <i>Path</i>: até 0,23% • ARM <i>Bucket</i>: até 0,34% • Max. Adjacências + ARM <i>Path</i>: 0,39%	• URM: 0,5 segundos • ARM <i>Path</i>: 7.637,85 segundos • ARM <i>Bucket</i>: 3.605,06 segundos • Max. Adjacências + ARM <i>Path</i>: até 3.356,32 segundos

FONTE: A autora (2023).

A abordagem URM foi eficaz para evitar a colheita de talhões contíguos no mesmo período do horizonte de planejamento. Na formulação ARM, ocorreu a formação de blocos de colheita: talhões adjacentes que não excedem a área máxima estipulada foram colhidos no mesmo período, gerando menores reduções nos valores da função objetivo em comparação com a formulação livre, que não considera restrições de área e com a formulação URM.

Com relação a abordagem ARM, quando o limite de área máxima dos blocos formados foi aumentado, foi observado um aumento no valor da função objetivo, se aproximando mais do Valor Presente Líquido obtido no cenário Livre.

Além disso, foi observado que quanto maior o limite de área máxima permitida para a formação de blocos de talhões nas restrições ARM, com a utilização do algoritmo *Path*, maior liberdade para a formação dos blocos para colheita, proporcionando menores impactos na função objetivo.

Com relação as duas abordagens ARM aplicadas no modelo matemático, a formulação *Bucket* tem a implementação computacional mais complexa do que a formulação *Path*, por conta do aumento na quantidade de variáveis e restrições, enquanto na segunda o crescimento do modelo ocorre apenas nas restrições em relação a quantidade de talhões da floresta analisada e da área máxima definida. Por outro lado, a abordagem *Path* demanda mais tempo para enumerar as combinações de talhões que formam o conjunto de restrições de adjacência do modelo matemático.

Os tempos de execução aumentaram consideravelmente na abordagem ARM, em ambas formulações testadas, em comparação com o cenário Livre e com a aplicação das restrições URM. Enquanto os cenários sem imposição de área máxima ou com a aplicação das restrições URM demandaram poucos segundos para encontrar uma solução factível, a inclusão das restrições ARM demandou cerca de duas horas de processamento por conta do aumento de restrições do modelo matemático.

O tempo computacional para enumerar as combinações de talhões adjacentes que excedem a área máxima, gerando as restrições da formulação *Path*, foi maior do que o tempo de resolução do modelo matemático, assim como mencionado no estudo de Llorente *et al.* (2017). Um exemplo disso é que ao considerar a abordagem ARM *Path* com área máxima de 40 ha, formulando restrições de até 8 talhões que excedem a área determinada, foram necessários 7.637,853 segundos no total. Porém, o software de otimização demandou apenas 3,31 segundos desse tempo para encontrar uma solução factível para o modelo, com GAP menor do que 0,01%, representando uma solução muito próxima da ótima.

Os cenários nos quais as restrições de adjacência não são incorporadas proporcionaram um melhor resultado do ponto de vista econômico. Assim como no estudo de Augustynczik (2014), nos cenários em que nenhuma restrição de adjacência foi aplicada, algumas áreas de colheita contíguas foram colhidas no mesmo ano.

Por outro lado, quando as restrições de adjacência foram aplicadas no modelo, a abordagem que gerou maiores valores na função objetivo foi a ARM, isso

decorre por conta da formação de blocos de talhões, que proporcionam maior flexibilidade em relação a seleção de talhões para colheita durante o período do horizonte de planejamento.

Em relação aos aspectos ambientais, a abordagem mais adequada foi a URM, porém não é tão interessante do ponto de vista econômico, pois o valor da função objetivo de maximização do VPL teve maiores reduções com a proibição da colheita de talhões adjacentes no mesmo ano e, além disso, a configuração espacial dos talhões demanda maiores custos da empresa florestal para construção e manutenção das estradas para obter acesso aos talhões agendados para corte.

Quando a abordagem é modificada, trocando a função de maximização do VPL por uma função objetivo de maximização da soma de arestas que representam adjacências entre pares de talhões adjacentes, a fim de considerar a configuração espacial e promover a agregação de talhões com imposição de área máxima determinada pelas restrições ARM, pode-se concluir que a formulação foi eficiente em formar blocos de colheita. Porém, é importante ressaltar que apesar da formulação favorecer, não garante a formação de blocos de colheita, ocorrendo também a seleção de talhões isolados e pequenos blocos em períodos do HP. Com a imposição de área máxima, a complexidade do modelo matemático aumentou significativamente. Além disso, com a alteração para a função objetivo de maximização de a soma de arestas entre talhões adjacentes, houve redução do VPL em comparação com as outras formulações testadas na dissertação.

Ao comparar os modelos com função objetivo de maximização do VPL e maximização de adjacências com a aplicação das restrições ARM *Path* utilizando o mesmo limite de área máxima, foi constatado pela espacialização dos talhões selecionados para corte que o modelo de maximização de adjacências resulta na formação de blocos maiores, sendo mais eficaz para agregação de talhões.

Portanto, de forma geral, pode-se concluir que o modelo ARM utilizando a formulação *Path* é mais adequado ao caso estudado, atendendo simultaneamente a aspectos econômicos e ambientais considerando como objetivo a maximização do VPL, com mais controle sobre a área dos blocos de talhões adjacentes sem ultrapassar a área máxima do que a abordagem *Bucket*. Na abordagem *Bucket*, como não há restrições impondo a conectividade dos blocos gerados, eles podem corresponder a regiões desconectadas, com área total inferior a área máxima. Porém,

ao utilizar a formulação *Path*, é necessário mais tempo computacional para resolução em comparação com outras abordagens citadas no estudo.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho contribui para futuros estudos, motivando as seguintes pesquisas:

- Aplicação do modelo matemático de agendamento da colheita florestal com restrições espaciais utilizando dados de florestas reais;
- A incorporação das restrições ARM com a aplicação de heurísticas com o objetivo de encontrar melhores soluções para o problema de agendamento da colheita florestal com restrições de área máxima em menor tempo de processamento;
- Considerar problemas de planejamento florestal integrado, como por exemplo, abordar o problema de agendamento da colheita florestal integrando decisões do planejamento de estradas, tais como construção e manutenção;
- Como o valor da FO de maximização da soma de arestas entre talhões adjacentes não necessariamente implica em um maior valor do VPL obtido ao final do horizonte de planejamento, também recomenda-se estudar o impacto da aplicação modelos de *Goal Programming* para considerar ambos os objetivos e buscar melhores resultados.

REFERÊNCIAS

ALCIDES, F. R. **Aspectos que influenciam o planejamento nas empresas florestais**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2018.

ARENALES, M. *et al.* **Pesquisa Operacional**. 6. ed. Rio de Janeiro: Elsever, 2007.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D. **Planejamento florestal otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2014.

AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. D. Spatial Forest harvest planning considering maximum operational areas. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 649-656, 2015.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia**. Elsevier Brasil, 2018.

BORGES, P.; BERGSENG, E.; EID, T. Adjacency constraints in forestry-a simulated annealing approach comparing different candidate solution generators. **Mathematical & Computational Forestry & Natural Resource Sciences**, v. 6, n. 1, 2014.

CERVEIRA, A.; MARTINS, I.; MOTA, A.; BENTO, J.; FONSECA, T. F. Otimização de Planos de Exploração Florestal em Baldios do Norte de Portugal. In **Investigação Operacional em Ação - Casos de Aplicação**; OLIVEIRA, R.C., FERREIRA, J.S., Eds.; Imprensa da Universidade de Coimbra: Coimbra, Portugal, p. 17–56, 2014.

CORREA, R.N. **Um modelo de programação linear com desigualdades válidas para o problema de agendamento de colheita florestal considerando aspectos econômicos e ambientais**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2020.

CORREA, R. N.; SCARPIN, C. T.; FERRARI, L. S.; ARCE, J. E. Application of relax-and-fix heuristic in the aggregation of stands for tactical forest scheduling. **Forest Policy and Economics**, v. 119, p. 102284, 2020.

CORREA, R. N.; SCARPIN, C. T. Problema de agendamento de colheita florestal: comparação entre dois modelos matemáticos considerando aspectos ambientais e econômicos. **IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, p. 1-18, 2019.

CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; BORGES, J.G. A new mixed-integer programming model for harvest scheduling subject to maximum area restrictions. **Operations Research**, v. 56, n.3, p. 542-551, 2008.

CROWE, K.; NELSON, J; BOYLAND, M. Solving the area-restricted harvest-scheduling model using the branch and bound algorithm. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 33, n. 9, p. 1804-1814, 2003.

- LLORENTE, I. D. P.; HOGANSON, H. M.; CARSON, M.T. Recognizing Spatial Considerations in Forest Management Planning. **Current Forestry Reports**. v. 3, n. 4, p 308-316, 2017.
- FRANÇA, L. C. J. *et al.* Forest landscape planning and management: a state-of-the-art review. **Trees, Forests and People**, v.8, p.100-275, 2022.
- GOMIDE, L. R. **Planejamento Florestal Espacial**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2009.
- GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; DA SILVA, A. L. Efeito das restrições espaciais de adjacência no planejamento florestal otimizado. **Floresta**, v. 40, n. 3, 2010.
- GOMIDE, L.; ARCE, J.; SILVA, A. L. Comparação entre a meta-heurística simulated annealing e a programação linear inteira no agendamento da colheita florestal com restrições de adjacência. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 449-460, 2013.
- GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A. T.; BARAHONA, F.; EPSTEIN, R.; WEINTRAUB, A. Harvest scheduling subject to maximum area restrictions: exploring exact approaches. **Operations Research**, v. 53, n. 3, p. 490-500, 2005.
- GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A.; VIELMA, J.P.; WEINTRAUB, A. Evaluating approaches for solving the area restriction model in harvest scheduling. **Forest Science**, v. 55, n. 2, p. 149-165.
- GUROBI OPTIMIZATION. **Gurobi 9.5.0**, 2021. Disponível em: <<https://www.gurobi.com/downloads/>>.
- JOHNSON, K. N.; SCHEURMANN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives - discussion and synthesis. **Forest Science**. Monograph, Washington, v. 18, n. 1, p. 1-31, 1977.
- LI, Y.; MEI, B.; LINHARES-JUVENAL, T. The economic contribution of the world's forest sector. **Forest Policy and Economics**, v. 100, p. 236-253, 2019.
- LUNA, H. P.; GOLDBARG, M. C. **Otimização combinatória e programação linear**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.
- MARTINS, I.; ALVELOS, F.; CONSTANTINO, M. A branch-and-price approach for harvest scheduling subject to maximum area restrictions. **Computational Optimization and Applications**, v. 51, n. 1, p. 363-385, 2010.
- MARQUES, A.S.; AUDY, J.F.; D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M. Tactical and Operational Harvest Planning. In **The management of industrial forest plantations**; Borges, J.G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M.; RODRIGUEZ, L.C.E., Springer, Netherlands, p. 27-59, 2014.
- 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. An overview of forest management planning and information management. In **The management of industrial forest plantations**; Borges, J.G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M.; RODRIGUEZ, L.C.E., Springer, Netherlands, p. 27-59, 2014.

RANDALL, R. M.; SASSAMAN, R. W. Identifying and evaluating environmental impacts associated with timber harvest scheduling policies [Mount Hood National Forest, Oregon]. **USDA Forest Service General Technical Report PNW (USA)**. n. 81., p. 1-20, 1979.

RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical programming**, v. 97, n.1, p.267-284, 2003.

RÖNNQVIST, M. *et al.* Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 11-40, 2015.

SANTOS, A. C. D. A. **Modelagem matemática para planejamento operacional integrado das atividades de colheita, baldeio e transporte**. [s.l.] (Universidade Federal de Viçosa, 2019).

SFEIR, T; ARCE, J.; FIGUEIREDO FILHO, A. Considerações sobre o uso de restrições ambientais de adjacência no setor florestal. **Enciclopédia Biosfera**, v. 17, n. 34, 2020.

SFEIR, T. A. **Planejamento integrado da colheita e do transporte florestal utilizando restrições de adjacência espacial**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2020.

STANG, M. B. **Planejamento florestal espacial para o agendamento otimizado das atividades de colheita**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2016.

STANG, M. B. *et al.* Spatial Forest Planning for Optimized Harvest Scheduling. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 1, p. 1-9, 2019.

TÓTH, S. F.; MCDILL, M. E.; KÖNNYÜ, N.; GEORGE, S. A strengthening procedure for the path formulation of the area-based adjacency problem in harvest scheduling models. **Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences**, v. 4, n. 1, p. 27-49, 2012.

TÓTH, S. F.; MCDILL, M. E.; KÖNNYÜ, N.; GEORGE, S. Testing the use of lazy constraints in solving area-based adjacency formulations of harvest scheduling models. **Forest Science**, v. 59, n. 2, p. 157-176, 2018.

ANEXO I – LISTA DE TALHÕES

TALHÃO	ÁREA (ha)	IDADE INICIAL (ANOS)
0	23,78	11
1	3,01	15
2	12,39	11
3	8,64	12
4	5,57	11
5	4,03	14
6	6,54	11
7	20,5	13
8	12,07	12
9	3,55	15
10	6,45	13
11	13,02	15
12	23,39	13
13	3,83	13
14	2,19	15
15	9,81	12
16	7,94	15
17	8,37	15
18	18,56	11
19	19,55	14
20	8,58	11
21	4,46	12
22	8,16	14
23	12,27	14

24	2,97	15
25	23,87	11
26	16,32	11
27	14,53	15
28	4,47	12
29	9,81	11
30	16,19	12
31	4,14	15
32	17,95	15
33	3,33	12
34	12,2	12
35	12,44	11
36	14,45	15
37	3,6	12
38	9,98	13
39	7,87	12
40	22,7	11
41	13,76	13
42	3,68	13
43	4,79	12
44	7,17	12
45	7,7	15
46	9,31	12
47	6,7	11
48	24,91	12
49	17,89	13
50	7,62	15

51	13,37	14
52	27,88	15
53	7,16	12
54	6,49	13
55	7,25	15
56	9,71	15
57	24,33	12
58	9,96	11
59	16,78	11
60	13,32	13
61	27,01	14
62	12,28	13
63	10,53	11
64	9,88	12
65	15,65	15
66	2,51	14
67	7,91	15
68	0,54	12
69	20,06	13
70	13,49	14
71	11,61	15
72	17,84	13
73	11,7	15
74	8,95	12
75	3,41	11
76	32,18	13
77	15,2	13

78	2,48	15
79	18,62	12
80	15,41	14
81	3,99	12
82	14,11	12
83	7,84	15
84	1,22	15
85	20,29	11
86	6,11	13
87	8,6	14
88	39,52	11
89	4,13	15
90	21,73	13
91	2,1	12
92	6,59	11
93	6,88	13
94	8,58	12
95	23,09	13
96	6,38	11
97	13,87	12
98	3,98	15
99	13,04	11

ANEXO II – LISTA DE ADJACÊNCIAS

TALHÃO	VIZINHOS	NÚMERO DE ADJACÊNCIAS (n_i)
0	51, 71, 77	3
1	14, 18, 24, 31, 78	5
2	4, 10, 35, 47, 54, 60	6
3	34, 70, 82	3
4	2, 54, 60	3
5	17, 22, 87	3
6	40, 63, 90	3
7	41, 62, 76, 99	4
8	12, 20, 29, 57, 65, 85	6
9	14, 23, 28, 66, 78	5
10	2, 35, 42, 60, 64, 93	6
11	16, 45, 52, 53, 69, 95, 98	7
12	8, 20, 25, 36	4
18	38, 64, 93, 95	4
14	1, 9, 21, 24, 28, 78, 84	7
15	19, 48, 82	3
16	11, 45, 52, 61, 95	5
17	5, 50, 56, 87	4
18	1, 21, 24, 31, 73, 75, 91	7
19	15, 82	2
20	8, 12, 25, 57	4
21	14, 18, 24, 28, 37, 68, 84, 91	8
22	5, 31	2
23	9, 28, 30, 33, 37, 66, 81, 96	8

24	1, 14, 18, 21, 84	5
25	12, 20, 36, 57, 59	5
26	30, 41, 62, 76, 83, 92	6
27	36	1
28	9, 14, 21, 23, 37, 66	6
29	8, 32, 44, 58, 85	5
30	23, 26, 32, 33, 41, 92	6
31	1, 18, 22	3
32	29, 30, 41, 58	4
33	23, 30, 50, 92	4
34	3, 63, 70, 82, 90	5
35	2, 10, 39, 47, 74, 93	6
36	12, 25, 27	3
37	21, 23, 28, 68, 81, 91, 96	7
38	18, 40, 64, 90, 95	5
39	35, 53, 74, 93, 95	5
40	6, 38, 63, 64, 90, 95	6
41	7, 26, 30, 32, 62	5
42	10, 43, 60, 64	4
43	42, 64, 90	3
44	29, 58, 67, 85, 96, 97	6
45	11, 16, 52, 61	4
46	70, 87, 89, 94	4
47	2, 35	2
48	15	1
49	51	1
50	17, 33, 55, 56, 92	5

51	0, 49	2
52	11, 16, 45, 61, 69, 88	6
53	11, 39, 69, 74, 93, 95, 98	7
54	2, 4, 60, 72, 99	5
55	50, 56, 76, 79, 83, 89, 92	7
56	17, 50, 55, 87, 89	5
57	8, 20, 25, 59, 65	5
58	29, 32, 44, 96	4
59	25, 57, 71, 77	4
60	2, 4, 10, 42, 54, 64, 72	7
61	16, 45, 52, 88	4
62	7, 26, 41, 76	4
63	6, 34, 40, 90	4
64	10, 18, 38, 40, 42, 43, 60, 90, 93	9
65	8, 57, 85	3
66	9, 23, 28	3
67	44, 73, 81, 96, 97	5
68	21, 37, 73, 81, 91	5
69	11, 52, 53, 74, 98	5
70	3, 34, 46, 80, 90, 94	6
71	0, 59, 77	3
72	54, 60, 86, 99,	4
73	18, 67, 68, 81, 91, 97	6
74	35, 39, 53, 69	4
75	18	1
76	7, 26, 55, 62, 79, 83, 86, 99	8
77	0, 59, 71	3

78	1, 9, 14	3
79	55, 76, 80, 86, 89, 94	6
80	70, 79, 90, 94	4
81	23, 37, 67, 68, 73, 96	6
82	3, 15, 19, 34	4
83	26, 55, 76, 92	4
84	14, 21, 24	3
85	8, 29, 44, 65, 97	5
86	72, 76, 79, 99	4
87	5, 17, 46, 56, 89	5
88	52, 61	2
89	46, 55, 56, 79, 87, 94	6
90	6, 34, 38, 40, 43, 63, 64, 70, 80	9
91	18, 21, 37, 68, 73	5
92	26, 30, 33, 50, 55, 83	6
93	10, 18, 35, 39, 53, 64, 95	7
94	46, 70, 79, 80, 89	5
95	11, 18, 16, 38, 39, 40, 53, 93	8
96	23, 37, 44, 58, 67, 81	6
97	44, 67, 73, 85	4
98	11, 53, 69	3
99	7, 54, 72, 76, 86	5