CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DE RESTRIÇÕES AMBIENTAIS DE ADJACÊNCIA NO SETOR FLORESTAL

Tamires de Almeida Sfeir¹, Julio Eduardo Arce², Afonso Figueiredo Filho²

¹ Mestre em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, Brasil.

² Professor Doutor do Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, Brasil.
e-mail para contato: tas.sfeir@gmail.com

Recebido em: 15/11/2020 – Aprovado em: 15/12/2020 – Publicado em: 30/12/2020
DOI: 10.18677/EnciBio_2020D11

RESUMO

A indústria florestal possui ampla utilização, isto faz com que ela possua importância estratégica em diversos países. O setor é responsável por cerca de 3% do produto bruto mundial. Apesar de apresentar vantagens frente a seus concorrentes nesta área, estudos apontam uma tendência de queda da participação global do Brasil na evolução da área de florestas plantadas e no PIB (Produto Interno Bruto) do setor, com queda de 3,3% no ano de 2016. Para superar a concorrência e quedas de desempenho, a indústria de produtos florestais deve mudar seu modo de fazer negócio e compreender melhor sua cadeia de suprimentos. Modelos matemáticos são amplamente utilizados para este fim e tiveram um incremento de complexidade em sua formulação ao longo dos anos, a fim de absorver novas demandas da indústria. Entre estas demandas pode-se citar a inclusão de restrições de adjacência, que limitam a área permitida para a colheita em um determinado período, minimizando assim, potenciais impactos ambientais. Objetiva-se, portanto, realizar uma revisão de literatura sobre o estado da arte do uso de restrições do tipo ARM (*Area Restriction Model*) e URM (*Unit Restriction Model*) no setor florestal.

PALAVRAS-CHAVE: Planejamento florestal; pesquisa operacional; restrições de adjacência.

CONSIDERATIONS ON THE USE OF ENVIRONMENTAL RESTRICTIONS OF ADJACENCY IN THE FOREST SECTOR

ABSTRACT

The forestry industry has strategic importance in several countries. The sector is responsible for about 3% of the world gross product. Despite presenting advantages concerning its competitors in this area, studies show a tendency for the global participation of Brazil to drop in the evolution of the planted forest area and the sector's GDP (Gross Domestic Product), with a reduction of 3.3% in 2016. To overcome the competition and decline in performance, the forest products industry must change the way it does business and better understand its supply chain. Mathematical models are widely used for this purpose and have had an increase in complexity in their formulation over the years to absorb new demands from the industry. Among these demands, we can mention the inclusion of adjacency

restrictions, which limit the area allowed for harvesting in a certain period, thus minimizing potential environmental impacts. Therefore, our objective is to carry out a literature review on the state of the art of the use of ARM (Area Restriction Model) and URM (*Unit Restriction Model*) restrictions in the forestry sector.

KEYWORDS: Forest planning, adjacency constraints; operations research.

INTRODUÇÃO

A principal matéria prima da indústria florestal, a madeira, é utilizada pelo homem a milhares de anos. Empregada tradicionalmente para construção, pode ser encontrada também em produtos químicos, na indústria alimentícia entre outros segmentos. As indústrias de base florestal utilizam a madeira de maneira quase integral. Desde o beneficiamento mecânico de toras, para a construção civil até a produção de fibras, para celulose (BELGACEM; PIZZI, 2016).

Com uma gama tão ampla de utilização, a indústria florestal possui importância estratégica em diversos países. Segundo Broz et al. (2018), o setor florestal contribui com cerca de 2% a 3% do produto bruto mundial. No Brasil, a contribuição de florestas plantadas no PIB (Produto Interno Bruto) industrial do ano de 2018 foi de 6,9% (IBÁ 2017). No ano de 2016, o Brasil exportou aproximadamente US\$ 10 bilhões em produtos florestais madeireiros e US\$ 340 milhões em produtos não madeireiros (SNIF, 2017). Estes valores corresponderam a cerca de 6% do total de exportações nacionais daquele ano.

O Brasil apresenta vantagens frente aos concorrentes neste setor. Em plantios, por exemplo, possui a maior produtividade florestal em volume de madeira por hectare ao ano, além de possuir o menor tempo de rotação (IBÁ, 2017). Entre os anos de 2012 e 2016 o Brasil aumentou as exportações de fibra celulósica em 52%. Com este resultado superou o Canadá em volume total, tornando-se o segundo maior exportador mundial (FAO, 2016). Porém, mesmo apresentando crescimento em determinados mercados e vantagens no desempenho da produtividade florestal, Moreira et al. (2017), apontam uma tendência de queda da participação global do Brasil na evolução da área de florestas plantadas. Corroborando com esta tendência o ano de 2016 apresentou uma queda de 3,3% no PIB do setor florestal (IBÁ, 2017).

Para superar a concorrência e quedas de desempenho, a indústria de produtos florestais deve mudar o modo de fazer negócio. Focando na demanda do cliente enquanto otimiza o uso de seus recursos e coordena suas atividades (LEHOUX et al., 2012). A fim de racionalizar os bens utilizados pelo setor, sejam estes: mão de obra, matéria-prima, tempo, entre outros, é importante entender o funcionamento da cadeia de suprimentos florestal.

Com uma cadeia divergente, a indústria florestal contém diversas etapas e atores. Entre estas está o manejo florestal, que inclui entre as decisões o planejamento do sequenciamento da colheita, que tem por objetivo satisfazer a demanda industrial (RÖNNQVIST et al., 2015). Estes autores ressaltam que nesta fase também é importante levar em consideração os aspectos relacionados as estradas florestais, pois, estas provêm acesso às áreas de colheita e o custo afeta a viabilidade do planejamento florestal.

Para otimizar o planejamento florestal modelos matemáticos podem ser utilizados. Estes modelos geralmente são formulados por meio de programação linear, ou ainda, programação linear inteira, caso variáveis presentes na formulação assumam valores inteiros (NASCIMENTO et al., 2012), ambas técnicas da pesquisa operacional. De acordo com Augustynczyk et al. (2015), os problemas de planejamento da colheita tiveram um aumento no nível de complexidade, pois,

consideram também na formulação relações de adjacência entre os talhões. Desta forma, objetivou-se com esta revisão, proporcionar maior compreensão sobre a utilização de restrições de adjacência no âmbito da colheita florestal.

DESENVOLVIMENTO

Nos anos de 1970 houve um aumento da preocupação com relação às questões ambientais relacionadas à colheita florestal (WEINTRAUB, 2007). Grandes áreas colhidas não são esteticamente agradáveis, promovem a erosão do solo por deixá-lo desprotegido, e podem gerar impactos à fauna local (CARVAJAL et al., 2013). A partir deste cenário, alternativas de manejo foram propostas para minimizar danos ambientais causados pela atividade florestal de colheita, dentre estas os modelos de planejamento utilizando o conceito de área máxima ou adjacência (WEINTRAUB, 2007).

O primeiro registro de restrições espaciais de adjacência ocorreu no trabalho de Thompson et al. (1973), em que os autores limitaram a área permitida para colheita em cada par de talhões adjacentes. Dentre as diversas estratégias duas abordagens são mais utilizadas, as restrições do tipo URM e restrições ARM, que estabelecem a área contígua máxima que poderá ser colhida em um mesmo ano do horizonte de planejamento.

Os modelos de colheita considerando restrições de adjacência possuem o conceito de tempo de *green-up* em seus modelos, garantindo um intervalo de tempo mínimo entre colheitas em unidades de manejo vizinhos (BORGES et al., 2014a). Os tempos de exclusão são utilizados geralmente quando um talhão é incapaz de se recuperar em menos de um ano, garantindo que a área colhida tenha se regenerado e não se formem grandes áreas desmatadas em períodos próximos (BOSTON; BETTINGER, 2001). Desta forma além de se impedir a colheita de talhões contíguos em um mesmo período, restringe-se também a colheita por um determinado intervalo de tempo de áreas vizinhas à uma já colhida.

Restrições de adjacência florestais têm sua origem na teoria dos grafos, mais especificamente no problema de conjuntos independentes, ou conjunto de estabilidade, em inglês conhecido por *Stable Set Problem* (SSP) (TÓTH et al, 2013).

O problema de conjuntos independentes pode ser explicado da seguinte maneira, sendo o grafo $G = (V, E)$ um grafo não orientado, o qual é constituído por um conjunto não nulo e finito de vértices V , e por um conjunto, também finito, de arestas E . O conjunto independente do grafo G pode ser definido por um conjunto de nós S , pertencentes à V , cujos vértices sejam pares não adjacentes (REBENNACK, 2008).

Unit Restriction Models

Segundo Tóth et al. (2013), o modelo de agendamento de colheita utilizando a abordagem URM pode ser representado por um grafo, em que seus nós correspondem às unidades de manejo e seus arcos são as relações de adjacência entre estas unidades. Considerando que o peso atribuído a um nó é o lucro obtido com o corte do talhão correspondente a ele, logo buscou-se encontrar o subconjunto de nós não conectados que retornem o maior peso possível, ou seja, o maior lucro, ao fim do período avaliado, o que torna o problema equivalente ao problema SSP.

As restrições do tipo URM proíbem que unidades de manejo adjacentes sejam colhidas em um mesmo período do horizonte de planejamento. Esta abordagem considera que a área máxima de colheita é definida pelo tamanho da unidade de manejo (KAŠPAR et al., 2016), sem importar o quão grande ou pequeno

é o talhão. Esta equivalência do modelo URM com o problema de conjuntos independentes possui como implicação o fato de que, assim como o SSP, a abordagem URM é *NP-Hard*, isto é, seus tempos de solução aumentam exponencialmente em função do número de restrições e variáveis do problema (TÓTH et al., 2013).

Area Restriction Models

Modelos utilizando a abordagem ARM são uma extensão dos modelos URM. Nestes ao invés de se conhecer previamente todos os potenciais *clusters* para colheita, como ocorre na formulação URM, incorpora-se no problema a formação de agrupamento de talhões, sem que se exceda a área máxima permitida (GOYCOOLEA et al., 2009). A abordagem ARM permite que talhões vizinhos sejam colhidos no mesmo período, desde que a área total colhida não ultrapasse o limite máximo imposto no planejamento (BORGES et al., 2014b).

Uma vez que talhões contíguos podem ser unidos em blocos, os modelos ARM tornam-se mais flexíveis com relação ao período e local da colheita, produzindo, teoricamente, funções objetivas maiores, quando comparadas à modelos URM (KAŠPAR et al., 2016).

Inicialmente considerava-se que problemas utilizando a abordagem ARM eram impossíveis de serem formulados de forma linear e apenas heurísticas ou metaheurísticas eram utilizadas para a resolução (TÓTH et al., 2013). No entanto, com o passar dos anos foram propostas formulações utilizando programação inteira para o problema (GOYCOOLEA et al., 2009). Dentre estes três modelos descritos na literatura para problemas com a restrição ARM são mais utilizados: a formulação *Path/Cover*, *Cluster/GMU* e *Bucket*.

A formulação *Path* ou *Cover*, proposta por McDill et al. (2002), enumeram de forma recursiva todos os conjuntos de talhões que excedem a área máxima definida pelo problema, criando restrições para cada uma das infactibilidades identificadas. Esta formulação cria restrições de maneira similar ao problema da mochila (GOYCOOLEA et al., 2009; TÓTH et al., 2013). Isto faz com que a quantidade de restrições do modelo possua natureza exponencial (MARTINS et al., 2014).

A abordagem *Generalized Management Units* (GMU), ou abordagem *Cluster*, também proposta por McDill et al. (2002), utiliza uma variável para cada bloco formado (*cluster*), cuja área total somada não exceda o valor estabelecido pelo problema. Esta abordagem pode utilizar restrições de adjacência usadas no modelo URM, uma que os potenciais *clusters* devem ser conhecidos antes da construção do modelo (TÓTH et al., 2013). Diferentemente da formulação *Path*, que possui uma quantidade exponencial de restrições, a abordagem *Cluster* gera uma quantidade exponencial de variáveis ao problema.

Por fim, a formulação *Bucket*, desenvolvida por Constantino et al. (2008). Esta formulação baseia-se na definição de *buckets a-priori*, em que cada talhão *i* é alocado em apenas um *bucket*, ou compartimento. Talhões designados para um mesmo *bucket* devem ser vizinhos, caso contrário divide-se o agrupamento mantendo apenas os talhões vizinhos, a soma de suas áreas não deve ultrapassar o limite determinado no modelo. Os compartimentos agendados para a colheita não poderão ser adjacentes (GOYCOOLEA et al., 2009). Nesta formulação o número de variáveis e restrições é polinomial (MARTINS et al., 2014).

Aplicações no planejamento florestal

Dong et al. (2015a), desenvolveram um modelo multiobjetivo que auxilia o gestor florestal no processo decisório maximizando o estoque de carbono, a produção de madeira e a agregação espacial das atividades de manejo. Os autores aplicaram o modelo aos dados de uma floresta real, localizada na região noroeste da China de aproximadamente 120.000 hectares, e três florestas hipotéticas. Entre as florestas geradas criou-se uma com padrão de idade jovem, outra com floresta mais antiga e uma considerada normal, com idade distribuída. O planejamento foi feito para um horizonte de 30 anos, dividido em três períodos de 10 anos cada. Entre as restrições incluiu-se a restrição de limite de área máxima, incluindo o talhão avaliado e seus vizinhos, caso este não atendesse ao limite imposto. A metaheurística AS (*simulated annealing*) foi utilizada para a resolução do problema. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que a estrutura de idade inicial da floresta afeta a qualidade da resposta e o tempo de processamento do problema. A floresta hipotética madura obteve a maior média dentre as soluções no menor tempo de processamento. Para um nível fixo de colheita os autores aumentaram a densidade de carbono por hectare das quatro estruturas estudadas, maximizando a função de utilidade.

Bettinger et al. (2015), avaliaram os efeitos do uso da reversão durante o processo de busca de s-metaheurísticas, que tem por objetivo intensificar a busca da solução ótima de um determinado problema em torno de uma região de ótimo local. A função objetivo do modelo utilizado busca minimizar os desvios quadrados do volume de madeira agendados para colheita de um volume alvo, em um horizonte de planejamento de 30 anos dividido em seis períodos de cinco anos. Os talhões podem ser colhidos apenas uma vez ao longo de todo horizonte, e caso um talhão seja adjacente a um vizinho em que será realizada a colheita, este não poderá ser colhido, independentemente da área, logo o modelo utiliza em sua formulação restrições do tipo URM.

O modelo foi aplicado em uma floresta hipotética de 1841 ha, dividida em 87 talhões baseada no mapa de uma floresta localizada na região oeste do Oregon, Estados Unidos. Foram considerados talhões vizinhos aqueles que dividiam pelo menos um lado em comum, gerando ao todo 210 relações de adjacência. Duas metaheurísticas de busca foram refinadas com o processo de reversão: busca tabu (BT) e o algoritmo *threshold accepting* (TA); e um algoritmo que utiliza a reversão na sua concepção: *raindrop method*. Para a BT e o TA também foram testadas diferentes opções de movimentação n-opt: 1-opt, 1-opt e 2-opt e por fim 1-opt, 2-opt e 3-opt. O pior resultado foi obtido pelo método *raindrop* com taxa de reversão de 0 iterações, ou seja, sem o processo de reversão, resultado esperado pois o algoritmo não funciona bem sem ela. Os autores concluíram que a reversão melhora a qualidade das soluções geradas pelos algoritmos e a taxa de reversão é um fator importante, que merece atenção, pois pode afetar a qualidade da solução (BETTINGER et al. 2015).

Kašpar et al. (2015), apresentaram um modelo multiobjetivo que contempla decisões relacionadas a questões ambientais e econômicas. Ao todo três objetivos foram inseridos no planejamento: a maximização da madeira colhida, minimizar o perímetro de reservas de florestas maduras, e minimizar a quantidade de madeira disponível nas áreas de florestas maduras. Ou seja, o modelo busca maximizar o volume de madeira colhida e otimizar a área de floresta madura, essencial para a manutenção da fauna local. É importante que esta região não seja nem muito

estreita nem tão longa, sendo preferencial que o formato seja semelhante a um círculo.

Os autores acima ainda afirmaram que o modelo exige ainda, entre suas restrições, que talhões adjacentes não sejam colhidos em um mesmo período. O modelo foi aplicado em uma floresta de 178 hectares, dividida em 363 talhões, com horizonte de planejamento de 30 anos, dividido em três períodos de 10 anos cada. Os resultados obtidos foram comparados às soluções alcançadas por um modelo com o objetivo de maximizar a colheita de madeira apenas, que também contém entre suas restrições o impedimento de colher talhões vizinhos. As soluções foram obtidas utilizando o Gurobi 5.5.0. O volume colhido de madeira foi menor no modelo proposto em comparação ao modelo que considera apenas a maximização da madeira colhida, uma vez que não existe a demanda em se manter uma área intacta. Os resultados demonstraram ainda que quanto maior a diferença de fluxo de madeira colhida permitida menor é a área não manejada e maior a área em que ocorre a derrubada de madeira.

John e Tóth (2015) propuseram um modelo de planejamento de colheita espacialmente explícito como alternativa aos modelos do tipo I e do tipo II, chamado pelos autores de modelo tipo IV. O novo modelo utiliza equações diferenciais e álgebra booleana para realizar a transição dos estados dos talhões ao longo do tempo. O modelo IV, diferentemente dos modelos I e II, trata atributos unitários, tal qual a receita obtida com a colheita, como variáveis e as calcula durante o processo de otimização.

Os autores supra citados demonstraram matematicamente a compatibilidade do novo modelo com restrições espaciais de adjacência do tipo ARM em três formulações: *Path*, *Cluster Packing* e *Bucket* e aplicaram duas em testes. Três conjuntos de testes foram realizados, aplicando o modelo proposto e os modelos I e II. O primeiro em uma floresta de *Pinus radiata* com 6.132,6 hectares localizada na Nova Zelândia. Nesta primeira floresta não existem restrições relacionadas a limites de área de corte, uma vez que não existe regulamentação por parte do governo neozelandês. A segunda foi uma floresta de 4.884 ha de *Pinus taeda* localizada na região sudoeste dos Estados Unidos. Neste cenário existe a restrição de abertura de no máximo 97 hectares e a limitação de abertura média de 48,5 hectares. Para lidar com estas restrições os autores utilizaram a abordagem *Cluster Packing* da formulação URM.

A última floresta, El Dorado, localiza-se na Califórnia, Estados Unidos, também está sujeita à limitação de 48,5 ha de abertura máxima permitida. Neste cenário utilizaram a formulação *Path* para trabalhar com a restrição espacial de adjacência. O horizonte de planejamento utilizado em todos os cenários foi de 25 anos, divididos em cinco períodos de cinco anos. A resolução dos modelos foi realizada com o *solver* CPLEX 12.1.0. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que o novo modelo possui desempenho computacional semelhante aos modelos tipo I e II, incluindo também preocupações importantes da modelagem como decisões intermediárias de tratamento e restrições máximas e médias de área, graças a sua formulação (JOHN; TÓTH, 2015).

Zengin et al. (2015), propuseram um modelo multiobjetivo que maximiza o volume de madeira colhida e a produção de água, incluindo na formulação restrições de adjacência do tipo URM. A inclusão de fatores hidrológicos no modelo é realizada pois o processo de evapotranspiração responde a estratégias de manejo aplicadas a florestas. O modelo foi aplicado na floresta de Belgrado, localizada na Turquia, com horizonte de planejamento de 100 anos, dividido em 10 períodos de 10 anos. Após a

construção do modelo principal, quatro estratégias, com a mudança das restrições utilizadas, foram testadas. As duas primeiras estratégias possuem o mesmo objetivo do modelo principal, mas diferem entre si nas restrições impostas. O primeiro não impõe equilíbrio no fluxo de madeira ao longo do horizonte de planejamento, e estabelece o limite de corte raso em no máximo 320 ha por período, no entanto não utiliza restrição de adjacência.

O segundo, assim como o primeiro, não utiliza a restrição URM, porém, impõe o equilíbrio do fluxo de madeira e determina que a produção de água em cada período seja maior que 10 milhões de metros cúbicos. As duas últimas estratégias têm sua função objetivo alterada, considerando apenas a maximização da produção de água, além disso, incluem também a restrição de adjacência. A estratégia três assim como a segunda, controla o equilíbrio do fluxo de madeira e impõe um volume mínimo de 10 milhões m³ de água produzido por período. Já a estratégia quatro não incorpora o equilíbrio do fluxo de madeira, impõem que a produção de água seja maior que 16 milhões m³ por período. Entre as estratégias avaliadas a que gerou o maior volume de madeira colhida ao final do horizonte de planejamento foi a estratégia um, com um total de 988.367 m³. Já a estratégia três garantiu o maior volume de água produzido (163,4 milhões m³), com o segundo maior volume de madeira colhido (939764 m³) (ZENGIN et al., 2015).

Dong et al. (2015b), compararam a eficiência das técnicas de busca em vizinhança, 1-opt e 2-opt, da metaheurística SA (*simulated annealing*) em problemas de planejamento de colheita florestal espacial. O modelo utilizado tinha por objetivo maximizar o VPL (Valor Presente Líquido) das atividades florestais com penalizações caso as metas de volume não fossem atendidas, nos 30 períodos do horizonte de planejamento, com cada um período possuindo um ano. Três alternativas do modelo foram apresentadas. A primeira não considerava restrições de adjacência, a segunda utilizava restrições do tipo URM com tempo de *green-up* de dois anos e a terceira restrições ARM com o mesmo período de *green-up*. Quatro florestas hipotéticas foram criadas e uma base de dados real de uma floresta localizada na China, foram utilizadas para a realização dos testes. As florestas hipotéticas geradas com diferentes perfis de distribuição de idade, sendo uma floresta jovem, uma normal, uma madura e uma espacialmente organizada. Os autores constataram que o movimento 2-opt, por intensificar a busca, produz resultados melhores em termos de valores máximos e médios das soluções e reduz o desvio padrão dos conjuntos de soluções.

Um sistema de suporte a decisão (SSD), o *Optimal*, foi desenvolvido por Marušák et al. (2015). O sistema foi criado e aplicado em sistemas de manejo de corte raso e *shelterwood* levando em conta aspectos ambientais e econômicos. Ele possui os principais componentes de um sistema de apoio à decisão: o sistema de gerenciamento de base de dados, em que é possível utilizar todas as bases de dados compatíveis com o ArcGis; o modelo de prognose florestal; e um modelo de otimização para o agendamento da colheita espacial. A função objetivo do modelo de otimização utilizado pelo sistema busca maximizar o volume de madeira colhida ao longo do horizonte de planejamento estabelecido em 30 anos, dividido em três períodos de 10 anos.

Estes autores ainda afirmaram que o modelo possui em sua formulação restrições que garantem o equilíbrio do fluxo de madeira e restrições de adjacência do tipo URM. A construção da matriz de adjacência pode ser realizada de acordo com as condições de vizinhança de Neumann ou Moore. O sistema foi utilizado em uma floresta de 494,8 hectares localizada na República Tcheca e permite a edição

dos talhões. Diferentes variações foram testadas, a primeira incluindo apenas restrições de adjacência (AdC), a segunda apenas com restrições de fluxo de madeira (HfC) e uma última incluindo ambas as restrições (ComP). Entre os modelos de adjacência (AdC) e as diferentes alternativas do modelo ComP, a versão que utiliza a matriz de vizinhança de Neumann obteve o maior volume de madeira colhida ao final do horizonte de planejamento em todos os testes.

Os impactos na lucratividade e na disponibilidade de biomassa, causados pela inclusão da restrição ARM no planejamento de uma floresta na região de Oslo, Noruega, foram avaliados por Borges et al. (2015). A região estudada possui 15.538 ha, sendo 12.084 ha de floresta produtiva. Quatro versões do problema, cuja função objetivo foi a maximização do VPL, foram avaliadas. A primeira versão, sem restrições (Nc), impôs apenas que apenas um tratamento fosse designado para cada talhão. O modelo dois promove o controle do volume colhido (Ch), não permitindo a flutuação do volume colhido entre períodos maior que um determinado limite. O terceiro modelo (ChOg) é uma extensão do segundo, pois, além de impor o controle do fluxo de volume de madeira, também demanda a existência de uma porcentagem mínima de floresta antiga em todos os períodos. O último modelo (ChOgOa) além das restrições incluídas nos modelos 2 e 3 possui restrições de área máxima (ARM). A abordagem utilizada pelos autores permite o uso de diferentes períodos de *green-up* e considera indiretamente o índice de sítio dos talhões. A inclusão da restrição de adjacência causou a redução do VPL em 7% em relação aos modelos três e dois e quando comparado ao modelo sem restrições (Nc) o modelo ChOgOa teve uma redução de 21,8% no VPL.

Bachmatiuk et al. (2015), avaliaram a *performance* da heurística SA com a mudança no número de movimentações realizadas em cada iteração, na resolução de um problema de colheita florestal formulados seguindo o modelo tipo I. Três alternativas de modelo foram testadas. O primeiro incluindo restrições de equilíbrio de fluxo. O segundo incorporando restrições de estoques finais de madeira e de carbono. Já o último modelo, além de todas as restrições anteriores, incluiu também a restrição ARM formulada segundo a abordagem *Path*. Os resultados obtidos pela heurística foram comparados aos encontrados pela solução obtida com a resolução do modelo exato solucionado pelo *solver* CPLEX. O problema buscou maximizar o VPL de uma floresta de eucalipto localizada em Portugal, contendo 1000 talhões, em um total de 11873 ha. Dois experimentos foram formulados, um contendo 30 períodos de um ano, totalizando um horizonte de planejamento de 30 anos, e um menor, com 15 anos de horizonte de planejamento.

Os autores incrementaram a quantidade de movimentos realizados pela heurística, partindo da abordagem clássica 1-opt, até a 3-opt, em que três talhões tiveram a posição alterada em uma mesma iteração. Além dos movimentos, os autores também avaliaram o efeito causado na resposta, por diferentes valores de parâmetro de resfriamento e de temperatura inicial da heurística. Para o primeiro experimento, com maior número de períodos, o movimento 1-opt obteve os melhores resultados em comparação aos demais movimentos em todos os modelos testados, e a maior temperatura inicial foi a que também gerou os melhores resultados para os três modelos neste experimento. No entanto, para o experimento dois, o movimento 2-opt alcançou os melhores resultados. Problemas de menor tamanho e com menor número de restrições foram facilmente resolvidos pelo método exato, porém, ao aumentar a complexidade do problema a metaheurística se destacou frente ao modelo exato consumindo menor capacidade computacional e alcançando soluções em instâncias não solucionadas pela alternativa exata.

Wei e Murray (2015) apresentaram dois modelos multiobjetivos, ambos com restrições URM, que visam entender os efeitos da incerteza espacial na colheita florestal. A incerteza espacial no âmbito da colheita florestal diz respeito a precisão na definição dos limites dos talhões. Uma vez que modelos URM restringem o corte de talhões adjacentes simultaneamente a incerteza na precisão das fronteiras de um talhão pode vir a identificar talhões não adjacentes como tal.

O primeiro modelo proposto teve por objetivo maximizar benefícios, podendo ser benefícios ambientais ou econômicos, como a maximização do VPL, e minimizar o risco total de relaxar as restrições de proximidade espacialmente incertas. Já o segundo também buscou a maximização dos benefícios da floresta, porém, minimizando o risco total de relaxar potenciais restrições de adjacência de um talhão. No primeiro modelo cada par de restrições de adjacência está associado a um risco, enquanto o modelo dois se concentra em um talhão e todo o conjunto de adjacências potenciais a ele relacionado. Os modelos foram implementados em *Python* e solucionados utilizando o *solver* comercial Gurobi. Os testes foram realizados utilizando como base dados de uma floresta localizada na região norte da Califórnia. O resultado obtido pelo modelo que considera a formulação tradicional URM obteve como resultado 5854,25 de retorno econômico. O modelo um resultou em um retorno de 5571,62 sem riscos de violação e o modelo dois obteve o maior resultado, 6876,95 com 387 riscos de violação (WEI; MURRAY, 2015).

Liu e Lin (2015) propuseram um algoritmo cultural para a resolução do planejamento de colheita florestal cujo objetivo foi maximizar o volume de madeira ao longo do tempo. O modelo impede que talhões adjacentes sejam colhidos em um mesmo período. Além da restrição URM, apenas talhões que contenham árvores com idade superior a 90 anos podem ser cortados e o volume colhido durante os períodos deve ser o mais equilibrado possível.

Segundo estes autores, algoritmos culturais são uma classe dos algoritmos evolucionários baseadas em teorias sociais e arqueológicas, em que a evolução cultural é vista como herança passada de uma população para seus descendentes e este conhecimento adquirido orienta o comportamento dos indivíduos. O algoritmo proposto começa com a criação indivíduos aleatórios na população inicial. O *fitness* de cada indivíduo da população inicial é avaliado e o espaço de crença é inicializado. Este espaço possui influência situacional e normativa sobre a população. A cada iteração o espaço populacional é ajustado tanto por operações evolucionárias (seleção, reparação, crossover e operações de balanceamento) e por operações de exploração culturais (sequenciamento, intercâmbio e mutação). O operador de sequenciamento, considerado o mais destrutivo dentre os operadores de exploração, encontra de maneira arbitrária duas partições de períodos vizinhos e troca todos os genes desta partição.

O operador de intercâmbio faz a troca entre dois genes de duas partições de períodos diferentes. Já o operador de mutação move um gene de uma partição de período para outra. Caso as restrições de idade mínima de corte e de adjacência forem violadas pelos movimentos realizados por estes dois últimos operadores as trocas não são executadas. Os resultados obtidos foram comparados pelo algoritmo proposto com os alcançados com a resolução do problema com a metaheurística SA e obtiveram resultados melhores com a nova abordagem de resolução (LIU; LIN, 2015).

Kadio ullari et al. (2015), simularam modelos de planejamento espacial de colheita utilizando o modelo *ETÇAPSimülasyon* do sistema de apoio à decisão ETÇAP, com o objetivo de examinar os efeitos de quatro estratégias de manejo

espaciais e uma estratégia sem restrições espaciais e seus efeitos a longo prazo na estrutura da floresta. O modelo utilizado pelo SSD é determinístico, ou seja, riscos biológicos, econômicos e ecológicos não são levados em consideração. A floresta, objeto de estudo, localiza-se em uma região de montanhas no oeste da Turquia, com 12265 ha, dos quais 8234 ha são áreas de floresta, divididos em 1596 talhões de aproximadamente 5.15 ha cada. As estratégias se diferenciaram em função do tamanho máximo de abertura permitido, tamanho mínimo de bloco, distância de adjacência e distância proximal, ou seja, a distância limite para considerar dois blocos adjacentes ou duas áreas máximas no caso da distância proximal, período de *green-up* e tamanho de bloco desejado. O modelo buscou maximizar o volume de madeira colhido e considerou também o desbaste da floresta. O modelo sem restrições espaciais foi o que gerou o maior volume de madeira ao longo do horizonte de planejamento avaliado, seguido da estratégia que considerou uma distância de adjacência e proximal de 25 metros, sendo uma forma de relaxação do problema pois compensou a limitação de área máxima permitida pela estratégia de 50 ha, a menor dentre as cinco estratégias.

Kašpar et al. (2016), não testaram os efeitos do uso das restrições espaciais em seu trabalho. Ao invés disso compararam a eficiência em termos de tempo de processamento ao utilizarem dois conceitos diferentes de representação de adjacência. O que os diferencia é a estrutura de armazenagem de dados e o algoritmo adequado para a criação das restrições. Os conceitos estudados foram: o desenvolvimento de restrições *pairwise* a partir de uma lista de adjacências, e o desenvolvimento de uma matriz de adjacência utilizando três algoritmos analíticos baseados em operações de álgebra linear simples.

Foi utilizado um modelo matemático de colheita florestal de baixa complexidade, em que as restrições de adjacência variaram de acordo com o conceito utilizado. Para a criação dos pares de restrição não foi necessário um tipo específico de algoritmo. Já para a matriz de adjacência três algoritmos baseados na simetria da matriz foram utilizados. O primeiro, baseado na simetria diagonal da matriz original, gera a matriz de adjacência triangular (TAM). O segundo algoritmo parte da premissa que linhas redundantes da matriz original podem ser deletadas, criando a matriz de adjacência de linhas (RAM). O último algoritmo leva a criação da matriz de adjacência triangular de linhas (RTAM), que é a combinação dos dois métodos anteriores. Amostras metodológicas foram criadas para a pesquisa (KAŠPAR et al. 2016).

O problema foi resolvido utilizando o solver Gurobi® 6.0.5. Os autores acima concluíram que a redução do número de restrições geradas pelos algoritmos testados pode diminuir a eficiência dos resultados obtidos pelo *branch and bound*. Comentaram ainda que a redução na quantidade de restrições não é necessária, pois, os *solvers* disponíveis atualmente não possuem limitação quanto ao número de restrições. Ademais, as restrições tradicionais obtiveram um resultado melhor na resolução do agendamento da colheita considerando restrições espaciais.

Diversos artigos que tratam do uso das restrições espaciais de adjacência utilizam o modelo tipo I como base de sua formulação. Em modelos do tipo I a variável de decisão representa um regime de manejo designado para cada área (unidade de manejo), que permanecerá até o final do horizonte de planejamento, gerando maior identidade para a unidade de manejo (RODRIGUES et al., 2006). Já no modelo tipo II a variável de decisão corresponde ao total de área plantada no período *i* que será cortada no período *j*, assim em cada novo período os talhões

podem ser reagrupados gerando a perda de identidade das unidades de manejo (LIMA, 1988).

McDill et al. (2016), compararam os modelos do tipo I e tipo II (JOHNSON; SCHEURMAN, 1977) em problemas com restrição de área, a fim de avaliar se o modelo tipo II possui potencial em aumentar os ganhos de eficiência na resolução dos problemas. A formulação *Path*, proposta por McDill et al. (2002), foi utilizada como referência para escrever as restrições de adjacência. A formulação *Path* demanda a identificação de cada grupo de talhões contíguos cuja área combinada exceda de forma limítrofe área máxima permitida, isto é, se qualquer talhão for retirado do grupo a combinação das áreas dos talhões restantes do grupo ou todas as áreas dos subgrupos remanescentes não irão exceder o limite imposto. Os autores testaram as diferentes formulações em 10 problemas reais e 150 problemas hipotéticos, que foram resolvidos utilizando o IBM ILOG CPLEX® 12.1.0. Os resultados obtidos mostraram que o tamanho do horizonte de planejamento foi o fator determinante ao compararem a eficiência entre os dois modelos. A formulação do tipo I foi superior nas instâncias cujo horizonte de planejamento era menor ou igual a uma rotação, porém com o aumento do tempo de planejamento o modelo tipo II obteve melhores resultados, mesmo gerando um número maior de restrições e variáveis.

Yoshimoto e Konoshima (2016) utilizaram o modelo tipo I como base para formular o problema de colheita florestal com múltiplos cortes e restrições de adjacência (URM). A restrição *green-up*, que para este estudo, impede que um talhão adjacente a um talhão colhido seja derrubado por um período determinado, também está presente na formulação do problema. O modelo foi formulado como um problema de programação inteira binário. A restrição de adjacência foi gerada através do produto de Kronecker de duas matrizes de adjacência. A primeira a tradicional matriz espacial de adjacência de localização do talhão. E a segunda, é a matriz de adjacência de atividade, para identificar tarefas de colheita simultâneas em um conjunto de tratamentos possíveis para um talhão. Os autores observaram que a proposta do uso da álgebra matricial, atender aos requisitos de *green-up* se tornaram mais fáceis, apenas mudando elementos da matriz, sem a necessidade de adicionar novas variáveis.

Os efeitos na produtividade causados pelas restrições do tipo ARM e *green-up* foram testados por Borges et al. (2016). Foram apresentadas três formulações para definir os requisitos de *green-up*. Todas foram baseadas na abordagem *green-up* dinâmica. Nesta uma área aberta possui unidades de manejo que podem ter sido colhidas em diferentes períodos de planejamento. Dessa forma, mesmo que o período de *green-up* seja o mesmo para todos os talhões a área aberta muda ao longo do tempo (BORGES et al., 2016). As alternativas propostas para a restrição foram: comprimento predefinido de tempo de *green-up* fixo; tempo variável predefinido de *green-up*; e informação de altura das árvores gerada pela simulação de crescimento. Segundo os autores os resultados que obtiveram o maior valor presente líquido foram as instâncias que permitiam tempo variável para o *green-up* e que recebiam como entrada as alturas geradas pelo simulador de crescimento. Esta última alternativa foi a que obteve as soluções mais rapidamente em comparação as demais formulações, além de sempre encontrar as soluções ótimas.

Troncoso et al. (2016), desenvolveram um índice de ameaça de incêndio, a nível de talhão e o incorporaram em um modelo de programação inteira mista sujeito a restrições de adjacência, com o objetivo de determinar estratégias que maximizassem o volume colhido de florestas com potencial para incêndios. O índice

desenvolvido pelos autores foi inserido na função objetivo do modelo que auxiliava na identificação de blocos com grande volume e que possuíam grande probabilidade de pegar fogo, acelerando a decisão por colhê-los e dessa forma minimizar o risco de incêndio florestal. Uma vez que foi assumido como premissa para o problema que o fogo não pode iniciar ou se espalhar em talhões já colhidos. O horizonte de planejamento do problema proposto foi de 50 anos, dividido em cinco períodos de 10 anos cada. O modelo incluía a restrição de unidade (URM), e para testá-lo foram geradas amostras metodológicas. Os autores obtiveram um ganho de 1% no volume colhido com a inserção do índice de ameaça de incêndio na função objetivo, a área restante, a área queimada foi reduzida em 18% e o volume remanescente sem queimar aumentou em 19%.

Dong et al. (2016) utilizaram na formulação de seu problema ambas as restrições espaciais de adjacência, URM e ARM, acrescidas, ainda, de um período de três anos de *green-up*. Os períodos de planejamento estudados foram de um ano, sendo inserido horizonte de planejamento tático. O objetivo dos autores foi avaliar técnicas de busca do algoritmo *simulated annealing* na resolução de problemas espaciais de agendamento de colheita. Seis estratégias foram testadas pelos autores, sendo cinco desenvolvidas por eles. A primeira utilizada como comparação das demais técnicas foi a busca convencional que utiliza o movimento 1-opt. A segunda estratégia, de busca em vizinhança, utiliza o movimento 2-opt alterado, em que o período de colheita designado e a prescrição de manejo de dois talhões são alteradas, e não trocadas, simultaneamente. A estratégia três é uma heurística híbrida, que oscila entre o processo de busca 1-opt e a 2-opt alterada. A quarta estratégia, de maneira similar à terceira, também oscila entre os movimentos 1-opt e 2-opt. No entanto, o período de colheita designado e a prescrição de manejo de dois talhões trocados. A quinta estratégia utiliza a técnica de busca em reversão como processo de busca. A estratégia tem início com o movimento 1-opt para diversificar a busca, a melhor solução é armazenada, o movimento 2-opt alterado é aplicado e o processo de busca retorna para o movimento 1-opt. A última estratégia é similar a quinta, porém utiliza o movimento 2-opt descrito na quarta estratégia. A capacidade computacional de demanda com as novas heurísticas foi significativamente maior do que a técnica de busca convencional, porém os resultados obtidos por estas foram melhores.

Liu et al. (2017) propuseram um problema de planejamento florestal que considera na sua formulação o desbaste e o comércio de carbono. O objetivo dos autores foi conseguir planejar a programação anual de desbaste de forma que tanto volume total de madeira colhida quanto o lucro obtido com o mercado de carbono fossem maximizados, respeitando, porém, a restrição de adjacência imposta pelo modelo proposto. Esta restrição impõe que, caso duas unidades de manejo dividam um mesmo limite, ou ponto geográfico, estas não poderão ser desbastadas no mesmo período.

Estes autores apresentaram um modelo matemático para a resolução do problema, que foi capaz de solucionar exemplos de pequena escala. Para resolver problemas maiores, Liu et al. (2017), utilizaram uma abordagem melhorada da heurística *Simulated Annealing* (*Improved Simulated Annealing Approach* – ISA). Esta abordagem faz buscas iterativas por uma solução próxima ao ótimo através de buscas espaciais locais e buscas em vizinhança. As simulações feitas para avaliar o novo algoritmo se mostraram superiores ao *simulated annealing*. Além disso, a inclusão do comércio de carbono nas decisões do modelo se mostrou vantajosa para a sustentabilidade dos recursos florestais.

A pesquisa de Akbulut et al. (2017) teve por objetivo avaliar se o uso de soluções iniciais em heurísticas com soluções geradas por um modelo de programação linear relaxada, levaria à melhores planos de manejo para florestas. Os resultados obtidos pelos autores foram comparados com os resultados alcançados com o uso de soluções iniciais aleatórias. Dois modelos foram propostos para o estudo, o primeiro refletia a realidade das florestas do oeste dos Estados Unidos, na região do Oregon. Estas florestas são compostas em sua maioria por abetos de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) e western hemlock (*Tsuga heterophylla*), ambas espécies coníferas nativas da região.

O modelo ocidental possui horizonte de planejamento de 30 anos, dividido em períodos de cinco anos, que correspondem também ao tempo de *green-up* requerido. O estado do Oregon limita as áreas de corte raso em 120 ac, o equivalente a 48,6 ha. A restrição ARM foi incluída para suprir esta demanda legal. Maximizar o fluxo contínuo de madeira colhida foi o objetivo deste modelo. O segundo modelo, retrata a realidade de florestas da região da Carolina do Sul, no sul dos Estados Unidos, em que a espécie dominante da plantação é *Pinus taeda*. Não existe lei que imponha limitações com relação à área máxima de corte raso permitida na Carolina do Sul, porém os autores também a utilizaram a restrição ARM, com o mesmo limite de área do modelo ocidental na região sul, pois essa é uma métrica comum em sistemas de certificação florestal (AKBULUT et al., 2017).

Este segundo modelo possui horizonte de planejamento de 20 anos, com períodos de um ano, típicos em planejamentos táticos da região, com períodos de *green-up* de três anos. O objetivo do modelo sulista é maximizar o VPL. Ambos os modelos foram formulados como modelos do tipo I. Ao todo 18 cenários foram criados, em que se modificou o método de conversão da solução linear relaxada para uma solução factível inteira para a heurística. Duas heurísticas de busca foram utilizadas, busca tabu e *threshold accepting*. Após inúmeros testes os autores concluíram que a estratégia de usar soluções iniciais oriundas de relaxações lineares não gera, necessariamente, respostas com qualidade maior que as obtidas com sementes aleatórias (AKBULUT et al., 2017).

Yoshimoto et al. (2017), propuseram uma nova abordagem para a tarefa de agregar talhões, em modelos de restrição de área, a fim de modelar o agendamento de colheita que permita múltiplos cortes, utilizando programação inteira compacta. A abordagem apresentada fez com que um conjunto de candidatos para agregação dos talhões fosse conhecido antes da otimização, com o objetivo de encontrar o padrão ótimo dentre o conjunto de candidatos ao longo do horizonte de planejamento. Testes foram realizados utilizando dados obtidos da região de Kochi, no Japão. Para a resolução do modelo o solver comercial CPLEX foi utilizado. Os resultados obtidos pelos autores validaram a utilização da abordagem para a resolução do agendamento de colheita com múltiplos cortes rasos. Ademais, os pesquisadores ressaltaram que a abordagem pode ser adaptada não apenas para melhorar a eficiência do manejo, mas também para objetivos ambientais. Por exemplo, alterando as regras para a criação dos candidatos para gerar conectividade de regiões para manutenção da fauna local.

Uma nova abordagem *branch-and-bound* foi proposta por Neto et al. (2017), para a resolução de problemas de agendamento da colheita florestal que inclui em sua concepção restrições de corte raso e área nuclear. Utilizaram a formulação ARM do tipo *Cluster*. Os autores testaram a abordagem em florestas variando de 32 a 1363 talhões, localizadas nos Estados Unidos e Canadá. Os horizontes de planejamento variaram de três a oito períodos, os quais variam de cinco a 10 anos

cada. A resolução dos modelos foi realizada com o auxílio do solver CPLEX, implementados com a linguagem *Python*. O principal objetivo foi testar a qualidade das soluções obtidas em bons tempos de resolução. O principal objetivo foi testar a qualidade das soluções obtidas em bons tempos de resolução. Os autores definiram duas horas como limite para o tempo de resolução. O método foi capaz de encontrar boas respostas inclusive para instâncias maiores.

Qin et al. (2017), propuseram um modelo multiobjetivo para avaliar os efeitos dos preços do carbono na relação existente entre o planejamento da colheita florestal, considerando restrições espaciais e o mercado de carbono. O modelo possuía entre suas restrições a restrição ARM, que limita a área máxima permitida para colheita em um período. Os autores aplicaram o modelo desenvolvido em uma floresta chinesa, com horizonte de planejamento de 30 anos, divididos em três períodos de 10 anos cada. A resolução do modelo foi feita utilizando o algoritmo SA. Os valores mínimos encontrados pelos autores para que a utilização de florestas para a captação de carbono seja economicamente atrativa giraram em torno de ¥ 800/ton. Os preços correntes para a época de avaliação não apresentaram efeitos relevantes na otimização quando comparados ao modelo que considerava preço zero.

Os reflexos gerados pelo uso de restrições de adjacência no planejamento da colheita sob a população de renas, foram avaliados por Cyr et al. (2017). Estes autores também simularam o desenvolvimento da rede viária florestal, pois também são responsáveis por impactos causados à espécie. O estudo foi aplicado na floresta boreal canadense. O risco de incêndios florestais, importante fator para a área estudada foi, também, simulado. O modelo de abastecimento de madeira proposto utilizava em sua formulação a restrição URM, em que as áreas operacionais são conhecidas *a-priori*. O modelo conta também com restrições de *green-up*. O modelo matemático foi resolvido utilizando a metaheurística SA e programação linear. O algoritmo *simulated annealing* foi utilizado para encontrar o melhor cronograma de colheita das áreas e o método exato, aplicado após a metaheurística, maximizou o volume colhido de madeira. O uso das restrições espaciais de adjacência resultou em impactos marginais na conservação da população de renas.

Caglayan et al. (2018), propuseram um modelo de programação linear inteira mista para realizar o planejamento das atividades de colheita, em uma floresta de carvalhos de 3.448,8 ha localizada na região norte da Turquia, auxiliando no processo de conversão de regimes de talhadia para alto fuste. Quatro estratégias de planejamento foram propostas para estimar o período de regeneração mais apropriado. Este período é o intervalo de tempo em que existe uma maior abundância de sementes, fator importante para o processo de conversão entre os regimes. O limite mínimo para o período de maturidade de sítios classe II foi definido pelos autores em 40 anos e em 60 anos para sítios classe III.

A estratégia 1 tinha por objetivo maximizar a produção de madeira em metros cúbicos, durante o horizonte de planejamento, estabelecido em 100 anos para todas as estratégias, e não possuía restrições especiais. A segunda estratégia incluiu restrições espaciais de adjacência, em que não é permitido realizar a colheita de mais de três talhões vizinhos em um mesmo período, ou seja, é possível fazer o agrupamento dos talhões em *clusters*, sendo desta forma uma abordagem da estratégia ARM. A estratégia 3 não incluiu restrições de adjacência, porém levou em consideração a formulação e o controle do fluxo de madeira colhida. Por fim, a estratégia 4 contou tanto com o controle do fluxo de colheita quanto com a restrição

de área. O modelo permitiu que a conversão do regime de talhadia para floresta de alto fuste fosse alcançada dentro do horizonte de planejamento definido através da regeneração natural e que a produção de madeira fosse otimizada. A estratégia sem restrições foi a que alcançou o melhor resultado em termos de volume de madeira colhida, e as estratégias que continham a restrição ARM (estratégia 2 e 4) tiveram desempenho semelhante, mesmo com a restrição de equilíbrio de fluxo, indicando a maior influência da limitação imposta pelas adjacências ao modelo (CAGLAYAN et al., 2018).

Ampliar o arcabouço de conhecimento sobre o equilíbrio entre a produção de madeira e o sequestro de carbono foi o objetivo de Dong et al. (2018a). Os autores estudam os efeitos de restrições econômicas e ambientais na produção de carbono e madeira, em quatro alternativas de planejamento de manejo em uma floresta localizada na região nordeste da China. As estratégias propostas pelos autores foram: estratégia de manejo direcionada ao carbono (*Carbon Management Strategy* - CMS), estratégia de manejo centrada na produção de madeira (*Timber Management Strategy* – TMS), estratégia de manejo multiobjetivo (*Multiobjective Management Strategy* – MMS), e por fim, a estratégia de manejo de restrição de recursos (*Resource Restricted Management Strategy* – RMS). Quatro variantes de cenários foram criadas para cada estratégia.

O objetivo dos cenários criados para a alternativa CMS foi maximizar o VPL do sequestro de carbono, enquanto para a estratégia TMS buscou-se maximizar o VPL da produção de madeira. A terceira alternativa (MMS) teve por objetivo maximizar o VPL tanto da produção de madeira quanto do sequestro de carbono. A estratégia RMS também visava maximizar o VPL da produção de madeira e do sequestro de carbono, porém submetida a metas mínimas de sequestro de carbono. Dois dos cenários das estratégias CMS, TMS e MMS possuíam também restrições do tipo ARM, com variação do tempo de *green-up* estabelecido. O modelo possuía horizonte de planejamento de 50 anos, dividido em 10 períodos de cinco anos (DONG et al. 2018a).

A resolução do problema foi realizada com auxílio da metaheurística SA. Os testes realizados pelos autores (DONG et al. 2018a) mostraram que, para o estudo de caso, o preço simulado do mercado de carbono que apresentou o melhor nível de equilíbrio entre a produção de madeira e o sequestro de carbono foi o de \$100,00. Ademais, os autores também observaram que a inserção da restrição de adjacência com tempo de *green-up* equivalente a dois períodos provocou a redução do VPL em aproximadamente 17,87% para a estratégia TMS e de 15,53% para a MMS em comparação aos cenários que não possuíam tal restrição.

Uma nova abordagem de resolução do planejamento da colheita florestal com restrições de área foi proposta por Yoshimoto e Asante (2018). O método MF-Model I soluciona o planejamento da colheita através do conceito do problema do fluxo máximo. O modelo proposto não necessita de regras definidas *a priori* para a criação ou preparação de *clusters*. A agregação dos talhões é realizada com a ideia de fluxo máximo, em que a área de cada talhão corresponde ao fluxo em cada unidade. As conexões de adjacência entre talhões vizinhos são os arcos do grafo. Todos os talhões são conectados à um *super* nó artificial, de forma que as restrições de fluxo máximo são formuladas para encontrar o melhor conjunto de talhões impondo uma área máxima, ou seja um fluxo máximo.

Após a definição dos conjuntos o modelo garante a conexão total de todos os talhões agregados, pois caso estejam conectados estarão sujeitos a um mesmo regime de manejo. O modelo permite múltiplas derrubadas ao longo do horizonte de

planejamento com o uso de intervalos de *green-up*. Todas estas questões temporais e espaciais são integradas por um componente do modelo. O método foi testado em dois mapas hipotéticos e em dados das florestas *Shulkell*, localizada na província canadense da Nova Escócia, e na floresta *El Dorado*, situada no estado da Califórnia, Estados Unidos (YOSHIMOTO; ASANTE, 2018).

A abertura máxima permitida para as florestas hipotéticas e *El Dorado* foi de 50 ha, enquanto para *Shulkell* limitou-se a 20 ha. O horizonte de planejamento dos cenários avaliados era composto de 15, 25 e 50 anos, com períodos de cinco anos. O intervalo de *green-up* para as instâncias de 15 e 25 anos foi de um período, já na instância de 50 anos testou-se o efeito de intervalos de 1, 2 e 3 períodos. A solução para os testes foi obtida com o *solver* CPLEX 12.7.0. Os resultados obtidos foram comparados com os valores alcançados pelas abordagens *Path* e *Bucket*. O modelo proposto superou a formulação *Bucket* em todos os 18 cenários avaliados e a abordagem *Path* em 10. O modelo foi superior a todas as abordagens a que foi comparado quando se fez uso de intervalos de *green-up* de duas a três períodos (YOSHIMOTO; ASANTE, 2018).

Silva et al. (2018) apresentaram um modelo matemático para a otimização do processo de exploração de impacto reduzido, uma vez que atividades relacionadas à colheita são responsáveis por 30% dos impactos negativos causados às árvores remanescentes da floresta. O estudo foi realizado em uma floresta ombrófila densa da região de Porto Acre, na região norte do Acre. O modelo proposto foi construído tendo como base o modelo clássico de localização de p-medianas, e sua função objetivo buscava minimizar a movimentação dos *skidders* no processo de transportar as árvores para os pátios de madeira. A formulação do modelo incluía também um conjunto de restrições de adjacência que impedia que *grids* vizinhos fossem colhidos em um mesmo período impedindo a criação de grandes áreas abertas.

Uma particularidade deste modelo é que o limite de colheita imposto é de cinco árvores por hectare por *grid*, uma vez que se trata da colheita de árvores tropicais nativas da região amazônica. Foram criados 32 cenários, 16 cenários para floresta balanceada e 16 para florestas desbalanceadas, solucionados utilizando o algoritmo *branch and bound* no *software* Lingo 14.0. A inclusão de restrições de número de árvores máxima permitida para colheita gerou um impacto na vegetação remanescente menor do que o plano de manejo atualmente executado na área e a restrição de adjacência teve impacto negativo nos lucros do planejamento (SILVA et al., 2018).

Avaliar os efeitos do número de soluções independentes no desempenho de processos de busca em vizinhança foi o objetivo do artigo de Dong et al. (2018b). Os autores utilizaram o algoritmo AS como abordagem base e testaram três técnicas de busca em vizinhança diferentes. O Método 1, utilizou o método de busca 1-opt. O Método 2 oscila entre o movimento 1-opt e o 2-opt permutado, ou trocado, em que ao invés de se inserir dois novos talhões à nova solução, inverte-se de posição talhões já presentes na solução corrente. Já o Método 3 utiliza apenas a versão permutada do algoritmo 2-opt.

Cinco florestas hipotéticas foram criadas para o estudo, com 400, 1.600, 3.600, 6.400 e 10.000 talhões, cada talhão contendo 10 ha e idades geradas aleatoriamente variando entre zero e 50 anos. As opções de manejo permitidas foram o corte raso, uma vez que as árvores do talhão tenham no mínimo 30 anos, ou a opção de não realizar a colheita do talhão. O objetivo do modelo avaliado foi maximizar o volume de madeira colhido durante o horizonte de planejamento

definido de 50 anos, dividido em períodos em 10 períodos de cinco anos (DONG et al., 2018b).

Três problemas foram criados para avaliar os impactos do número de soluções independentes gerados. O primeiro não inclui nenhum tipo de restrição de adjacência, porém, possui em sua formulação restrições de equilíbrio de fluxo e de estoque final. O segundo, além das restrições incluídas na primeira formulação considera também a restrição URM. O último modelo ao invés de utilizar a restrição URM faz uso da ARM. As restrições de adjacência incluem a limitação de tempo de *green-up* de dois períodos. Dong et al., (2018b) também observaram que não houve método considerado melhor para todas as abordagens. O número ótimo de soluções independentes necessárias para a resolução do problema incluindo a restrição ARM segue uma função logarítmica negativa relacionada ao tamanho do problema, porém, o número de soluções não foi sensível ao tamanho do problema tanto para a formulação sem restrições espaciais quanto para a URM. O tipo de adjacência apesar de possuir efeito moderado no número de soluções independentes geradas não chegou a ser estatisticamente significativo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta revisão conceitos de restrições de adjacência, como sua origem na teoria dos grafos e a diferenciação dos modelos de restrição de área e modelos de restrição de unidade foram apresentados. Partindo da definição de conceitos aplicações no planejamento florestal foram apresentadas e a partir destas pode-se observar que a restrição do tipo ARM foi a mais utilizada pelos pesquisadores nos artigos. A preferência por modelos de restrição de área frente aos modelos de restrição de unidade está na flexibilidade alcançada com este tipo de abordagem, que torna possível a colheita de talhões vizinhos, uma vez que a área combinada destes não ultrapasse o limite imposto pelo modelo.

Para lidar com a natureza complexa do problema de colheita florestal considerando restrições de adjacência, muitos artigos utilizaram métodos heurísticos como método de resolução. Problemas do tipo NP-Hard, como o tratado por esta revisão, têm seus tempos de solução crescendo exponencialmente em função do número de restrições e variáveis do problema. Isto tende a tornar o tempo de resolução por métodos exatos muito longos, justificando a escolha por heurísticas para encontrar boas soluções com menor tempo de processamento. Entre os algoritmos utilizados destaca-se a relevância da metheurística *Simulated Annealing*.

REFERÊNCIAS

AKBULUT, R.; BETTINGER, P.; UCAR, Z.; OBATA, S.; BOSTON, K. SIRY, J.; Spatial forest plan development using heuristic processes seeded with a relaxed linear programming solution. **Forest Science**, v. 63, n. 5, p. 518-528, 2017. Disponível em: <<https://academic.oup.com/forestscience/article/63/5/518/4583995>> doi: <https://doi.org/10.5849/FS-2017-040>

AUGUSTYNCZIK, A.L.D.; ARCE, J.E.; SILVA, A.C.L. da. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 649-656, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602015000400649&script=sci_arttext> doi: <https://doi.org/10.1590/01047760201521042006>

BACHMATIUK, J.; GARCIA-GONZALO, J.; BORGES, J. G. Analysis of the performance of different implementations of a heuristic method to optimize forest harvest scheduling. **Silva Fennica**, 2015. Disponível em: <<https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/13803>> doi: 10.14214/sf.1326

BELGACEM, M.N.; PIZZI, A. (Ed.). **Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook: Renewable Materials for Today's Environment**. John Wiley & Sons, 2016.

BETTINGER, P.; DEMIRCI, M.; BOSTON, K. Search reversion within s-metaheuristics: impacts illustrated with a forest planning problem. **Silva Fennica**, v. 49, n. 2, 2015. Disponível em: <<https://ir.library.oregonstate.edu/concern/articles/td96k441d>> doi: <https://doi.org/10.14214/sf.1232>

BORGES, P.; MARTINS, I.; BERGSENG, E.; EID, E.; GOBAKKEN, T. Effects of site productivity on forest harvest scheduling subject to green-up and maximum area restrictions. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 5, p. 507-516, 2016. doi: <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1089931>

BORGES, P.; EID, T.; BERGSENG, E. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 3, p. 700-710, 2014a. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.039>

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, 2014b.

BORGES, P.; BERGSENG, E.; EID, T.; GOBAKKEN, T. Impact of maximum opening area constraints on profitability and biomass availability in forestry-a large, real world case. **Silva Fennica**, v. 49, n. 5, p. 1-21, 2015. Disponível em: <<https://silvafennica.fi/article/1347>> doi: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1347>

BOSTON, K.; BETTINGER, P. The economic impact of green-up constraints in the southeastern United States. **Forest Ecology and Management**, v. 145, n. 3, p. 191-202, 2001. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00417-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00417-5)

BROZ, D.; ROSSIT, D.A.; ROSSIT, D.G.; CAVALLIN, A. The Argentinian forest sector: opportunities and challenges in supply chain management. **Uncertain Supply Chain Management**, pp. 375-392, 2018. Disponível em: <<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/89552>> doi: 10.5267/j.uscm.2018.1.001.

CAGLAYAN, .; YE IL, A.Y.; ZENGİN, H.; ÜNAL, M.E. Spatial harvest scheduling for oak coppices conversion into high forest involving wood production management. **BOSQUE**, v. 39, n. 2, p. 177-190, 2018. Disponível em: <<http://revistas.uach.cl/index.php/bosque/article/view/3538>> doi: <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200177>

CARVAJAL, R.; CONSTANTINO, M.; GOYCOOLEA, M.; VIELMA, J.P.; WEINTRAUB, A.; Imposing connectivity constraints in forest planning models. **Operations Research**, v. 61, n. 4, p. 824-836, 2013. Disponível em: <<https://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/opre.2013.1183>> doi: <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1183>

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. doi: <https://doi.org/10.1287/opre.1070.0472>

CYR, G. RAULIER, F.; FORTIN, D.; POTHIER, D. Using operating area size and adjacency constraints to mitigate the effects of harvesting activities on boreal caribou habitat. **Landscape Ecology**, v. 32, n. 2, p. 377-395, 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10980-016-0455-x>> doi: <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0455-x>

DONG, L.; BETTINGER, P.; LIU, Z.; QIN, L. Spatial forest harvest scheduling for areas involving carbon and timber management goals. **Forests**, v. 6, n. 4, p. 1362-1379, 2015a. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-4907/6/4/1362>> doi: <https://doi.org/10.3390/f6041362>

DONG, L.; BETTINGER, P.; LIU, L.; QIN, H. A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: A case study of the simulated annealing algorithm. **Forest Ecology and Management**, v. 356, p. 124-135, 2015b. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.026>

DONG, L.; BETTINGER, P.; LIU, L.; QIN, H.; ZHAO, Y. Evaluating the neighborhood, hybrid and reversion search techniques of a simulated annealing algorithm in solving forest spatial harvest scheduling problems. **Silva Fennica**, v. 50, n. 4, p. 1-20, 2016.

DONG, L.; BETTINGER, P.; QIN, H.; LIU, Z. Reflections on the number of independent solutions for forest spatial harvest scheduling problems: a case of simulated annealing. **Silva Fennica**, v. 52, n. 1, p. 7803, 2018b. Disponível em: <<https://www.silvafennica.fi/article/7803>> doi: <https://doi.org/10.14214/sf.7803>

DONG, L.; LU, W.; LIU, Z. Developing alternative forest spatial management plans when carbon and timber values are considered: A real case from northeastern China. **Ecological Modelling**, v. 385, p. 45-57, 2018a. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.07.009>

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global forest products facts and figures**, s.l.: s.n. 2016

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, 2009. Disponível em: <https://academic.oup.com/forestscience/article/55/2/149/4604425> doi: <https://doi.org/10.1093/forestscience/55.2.149>

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório 2017**, s.l.: s.n. 2017

JOHN, R. S.; TÓTH, S. F. Spatially explicit forest harvest scheduling with difference equations. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 235-257, 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-012-1301-4>> doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1301-4>

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives—discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 23, n. suppl_1, p. a0001-z0001, 1977.

KADIO ULLARI, A. .; KELE , S.; BA KENT, E.Z.; BINGÖL, Ö. Controlling spatial forest structure with spatial simulation in forest management planning: a case study from Turkey. **Sains Malaysiana**, v. 44(n. 3), pp. p. 325-336, 2015. doi: 10.17576/jsm-2015-4403-03

KAŠPAR, J., MARUŠÁK, R.; HLAVATÝ, R. A forest planning approach with respect to the creation of overmature reserved areas in managed forests. **Forests**, v. 6, n. 2, p. 328-343, 2015. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-4907/6/2/328>> doi: <https://doi.org/10.3390/f6020328>

KAŠPAR, J.; MARUŠÁK, R.; BETTINGER, P. Time efficiency of selected types of adjacency constraints in solving unit restriction models. **Forests**, v. 7, n. 5, p. 102, 2016. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-4907/7/5/102>> doi: <https://doi.org/10.3390/f7050102>

LEHOUX, N.; MARIER, P.; D'AMOURS, S.; OUELLET, D.; BEAULIEU, J. The value creation network of Canadian wood fibre. **Interuniversity Research Center on Enterprise Networks, Logistics and Transportation. Scientific Report Cirrelt**. 210, 2012. Disponível em: <https://www.cirrelt.ca/documentstravail/cirrelt-2012-34.pdf>

LIMA, A.B.N.P.M. **Plano ótimo econômico de manejo de corte para florestas de eucaliptos**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Agronomia). Universidade de São Paulo, 1988.

LIU, W.-Y.; LIN, C.-C. Spatial forest resource planning using a cultural algorithm with problem-specific information. **Environmental Modelling & Software**, v. 71, p. 126-137, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.06.002>

LIU, W.-Y.; LIN, C.-C.; SU, K.-H. Modelling the spatial forest-thinning planning problem considering carbon sequestration and emissions. **Forest Policy and Economics**, v. 78, p. 51-66, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.01.002>

MARTINS, I.; YE, M.; CONSTANTINO, M.; FONSECA, M. C.; CADIMA, J. Modeling target volume flows in forest harvest scheduling subject to maximum area restrictions. **Top**, v. 22, n. 1, p. 343-362, 2014. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11750-012-0260-x>> doi: <https://doi.org/10.1007/s11750-012-0260-x>

MARUŠÁK, R.; KAŠPAR, J.; VOP NKA, P. Decision Support Systems (DSS) optimal—A case study from the Czech Republic. **Forests**, v. 6, n. 1, p. 163-182,

2015. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-4907/6/1/163>> doi: <https://doi.org/10.3390/f6010163>

MCDILL, M. E.; TÓTH, S. F.; JOHN, R. S.; BRAZE, J.; REBAIN, S. A. Comparing Model I and Model II Formulations of Spatially Explicit Harvest Scheduling Models with Maximum Area Restrictions. **Forest Science**, v. 62, n. 1, 2016.

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. Disponível em: <<https://academic.oup.com/forestscience/article/48/4/631/4617195>> doi: <https://doi.org/10.1093/forestscience/48.4.631>

MOREIRA, J.M.M.Á.P.; SIMIONI, F.J.; DE OLIVEIRA, E.B. Importância e desempenho das florestas plantadas no contexto do agronegócio brasileiro. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 85-94, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/47687>> doi: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v47i1.47687>

NASCIMENTO, F.A.F.; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO, A.; ARCE, J. A.; MIRANDA, G. M. Uso da meta-heurística otimização por enxame de partículas no planejamento florestal. **Scientia Florestalis**. Vol. 40, n.96, pp. 557-565, 2012. Disponível em: <<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr96/cap14.pdf>>

NETO, T.; CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; PEDROSO, J.P. Forest harvest scheduling with clearcut and core area constraints. **Annals of Operations Research**, v. 258, n. 2, p. 453-478, 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-016-2313-2>> doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2313-2>

QIN, H.; DONG, L.; HUANG, Y. Evaluating the effects of carbon prices on trade-offs between carbon and timber management objectives in forest spatial harvest scheduling problems: a case study from northeast China. **Forests**, v. 8, n. 2, p. 43, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-4907/8/2/43>> doi: <https://doi.org/10.3390/f8020043>

REBENNACK, S. Stable Set Problem: Branch & Cut Algorithms. In: FLOUDAS C.A.; PARDALOS P.M. (Eds.). **Encyclopedia of Optimization**. Springer, p. 3676–3688, 2008.

RODRIGUES, F.L.; SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. E. M. Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 769-778, 2006. Disponível: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622006000500010&script=sci_arttext&tlng=pt> doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000500010>

RÖNNQVIST, M. et al. Operations research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 11-40, 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-015-1907-4>> doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1907-4>

SILVA, P.H.; GOMIDE, L. R.; FIGUEIREDO, E. O.; CARVALHO, L. M. T.; FERRAZ-FILHO, A. C. Optimal selective logging regime and log landing location models: a

case study in the Amazon forest. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 1, p. 18-27, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0044-59672018000100018&script=sci_arttext> doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4392201603113>

SNIF, Sistema Nacional de Informações Florestais. **Comércio Externo: Exportação**. 2017 Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&catid=14&id=246> [Acesso em 10/09/2020].

THOMPSON, E.F.; HALTERMAN, B.G.; LYON, T.J.; MILLER, R.L. Integrating timber and wildlife management planning. **The Forestry Chronicle**, v. 49, n. 6, p. 247-250, 1973 Disponível em: < <https://pubs.cif-ifc.org/doi/pdf/10.5558/tfc49247-6>>

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, 2013. Disponível em: <<https://academic.oup.com/forestscience/article/59/2/157/4583684>> doi: <https://doi.org/10.5849/forsci.11-040>

TRONCOSO, J.J.; WEINTRAUB, A.; MARTELL, D.L. Development of a threat index to manage timber production on flammable forest landscapes subject to spatial harvest constraints. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 54, n. 3, p. 262-281, 2016. doi: <https://doi.org/10.1080/03155986.2016.1197543>

WEI, R.; MURRAY, A.T. Spatial uncertainty in harvest scheduling. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 275-289, 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-012-1178-2>> doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1178-2>

WEINTRAUB, A. Integer programming in forestry. **Annals of Operations Research**, v. 149, n. 1, p. 209-216, 2007. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10479-006-0105-9>> doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-006-0105-9>

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P. A new optimization model for spatially constrained harvest scheduling under area restrictions through maximum flow problem. **Forest Science**, v. 64, n. 4, p. 392-406, 2018. Disponível em: <<https://academic.oup.com/forestscience/article/64/4/392/4989365>> doi: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxy006>

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P.; KONOSHIMA, M. Optimal forest stand aggregation and harvest scheduling using compactly formulated integer programming. **FORMATH**, v. 16, p. 22-31, 2017. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/formath/16/0/16_16.003/_article/-char/ja/> doi: <https://doi.org/10.15684/formath.16.003>

YOSHIMOTO, A.; KONOSHIMA, M. Spatially constrained harvest scheduling for multiple harvests by exact formulation with common matrix algebra. **Journal of forest research**, v. 21, n. 1, p. 15-22, 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10310-015-0507-0>> doi: <https://doi.org/10.1007/s10310-015-0507-0>

ZENGİN, H.; ASAN, U.; DESTAN, S.; UNAL, M.E.; YESİL, A.; et al. Modeling harvest scheduling in multifunctional planning of forests for longterm water yield optimization. **Natural Resource Modeling**, v. 28, n. 1, p. 59-85, 2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/nrm.12057>> doi: <https://doi.org/10.1111/nrm.12057>