

Andrey Lessa Derci Augustynczik¹, Julio Eduardo Arce¹, Arinei Carlos Lindbeck da Silva¹

PLANEJAMENTO ESPACIAL DA COLHEITA CONSIDERANDO ÁREAS MÁXIMAS OPERACIONAIS

Palavras chave:
Colheita florestal
Restrições de área máxima
Planejamento florestal

Histórico:
Recebido 28/04/2015
Aceito 27/11/2015

Keywords:
Forest harvesting
Maximum area constraints
Forest planning

Correspondência:
andreylessa@gmail.com

RESUMO: Um dos maiores desafios com que se deparam os gestores na realização do planejamento da produção florestal se refere às questões logísticas das operações de colheita. O planejamento operacional da colheita florestal deve ser realizado de forma a conciliar as questões econômicas e ambientais, buscando aumentar a eficiência e mitigar danos relacionados à abertura da cobertura florestal. A inclusão de relações espaciais no planejamento da colheita florestal usualmente é realizada por meio de restrições de adjacência. Para resolver este tipo de problema os principais enfoques utilizados são a abordagem URM (Unit Restriction Model) e a abordagem ARM (Area Restriction Model). Neste contexto, o objetivo do estudo foi realizar o planejamento florestal otimizado dos 236 talhões de uma floresta composta por *Pinus taeda* e *Eucalyptus sp.*, incorporando ao modelo restrições clássicas como área disponível e equilíbrio, entre outras, e as restrições de adjacência do tipo URM e ARM, avaliando seu efeito no resultado da otimização. Com os resultados da otimização é possível concluir que abordagens ARM e URM são alternativas viáveis para tratar de problemas de agendamento da colheita florestal, sendo que para a área em questão a abordagem ARM é a mais adequada, devido à possibilidade de obter maiores retornos econômicos, respeitando áreas limites de colheita.

SPATIAL FOREST HARVEST PLANNING CONSIDERING MAXIMUM OPERATIONAL AREAS

ABSTRACT: One of the biggest challenges that forest managers face in forest planning is related to logistic issues of forest harvesting. The operational planning of forest harvesting must consider simultaneously the economic and environmental concerns, searching for increasing the efficiency and mitigating environmental damage related to the opening of forest cover. The inclusion of spatial aspects in forest harvesting is usually done through adjacency constraints. The main approaches to solve this sort of problem are ARM (Area restriction Model) and URM (Unit Restriction Model) models. In this context, the objective of this study was to perform the optimized forest planning of 236 stands of a *Pinus taeda* and *Eucalyptus sp.* forest, incorporating classical constraints like available area, timber flow, among others, and ARM and URM constraints, evaluating their effects on the optimization results. With the optimization outcomes, it is possible to conclude that ARM and URM model approaches are viable alternatives for solving forest harvest scheduling problems, being the ARM approach most suited for our case study, due to the possibility of higher profitability, while respecting maximum harvesting areas.

DOI:

10.1590/01047760201521042006

¹ Universidade Federal do Paraná - Curitiba, Paraná, Brasil

INTRODUÇÃO

Uma das fases mais importantes do planejamento da produção florestal se refere ao agendamento espacial da colheita. A alocação adequada das máquinas florestais na área possibilita a obtenção de um manejo florestal satisfatório, conciliando os aspectos econômicos e ambientais destas operações. Com isso, é possível garantir a obtenção de todos os bens e serviços proporcionados pela floresta, minimizando os impactos ambientais negativos relacionados à movimentação do maquinário florestal e à abertura da cobertura florestal.

Atualmente, os problemas relacionados com o planejamento operacional da colheita ganharam complexidade, demandando considerações do tamanho e proximidade dos talhões, usualmente incorporadas a modelos de planejamento por meio de relações adjacência (MCDILL; MANNING, 2011). Estas relações de adjacência são formuladas por meio de duas abordagens principais, a abordagem URM (*Unit Restriction Model*) e a abordagem ARM (*Area Restriction Model*). A abordagem URM (*Unit Restriction Model*) impede que talhões adjacentes sejam colhidos no mesmo ano do Horizonte de Planejamento (HP), independentemente de sua área. A abordagem ARM (*Area Restriction Model*), leva em consideração a área dos talhões, permitindo que talhões contíguos sejam colhidos no mesmo ano do horizonte de planejamento, desde que a área do bloco formado não exceda a área máxima de corte raso determinada (ZHU et al., 2007).

Devido à complexidade na resolução de problemas de planejamento espacial envolvendo a abordagem ARM, uma série de heurísticas foram aplicadas com objetivo de obter soluções em tempos razoáveis de processamento (VIELMA et al., 2007; DONG et al., 2015; GÓMEZ et al., 2011; SHAN et al., 2012; GOMIDE et al., 2013; KAŠPAR et al., 2013; CROWE; NELSON, 2005; BOYLAND et al., 2004; ZHU; BETTINGER, 2008). Entretanto, com o avanço dos softwares de otimização, formulações exatas foram propostas (GOYCOOLEA et al., 2005). Exemplos de modelos de Programação Linear Inteira (PLI) e Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para resolução de problemas com área máxima de colheita são encontrados em McDill et al. (2002) e Constantino et al. (2008).

Na literatura é possível encontrar uma série de estudos aplicando restrições de áreas máxima em problemas de planejamento florestal (ex. TÓTH et al., 2013; BORGES et al., 2015; BACHMATIUK et al., 2015; KÖNNYÜ; TÓTH, 2013). Adicionalmente, diferentes formulações de restrições de adjacência tipo ARM

foram propostas com o objetivo produzir modelos mais compactos e reduzir os tempos de processamento (ex. TÓTH et al., 2012; CONSTANTINO et al., 2008; CARVAVAL et al., 2010). Embora a inclusão de restrições de adjacência em problemas de planejamento florestal seja um tema recorrente na literatura, estudos em florestas plantadas ainda são escassos. Neste contexto, os objetivos do presente estudo foram: (i) incorporar restrições de adjacência a um modelo de planejamento florestal otimizado em uma floresta plantada, utilizando as abordagens URM e ARM, aplicando o modelo proposto por McDill et al. (2002) para a formulação ARM e (ii) avaliar os resultados obtidos através de ambas abordagens no que se refere aos padrões de dispersão dos talhões agendados para a colheita e sobre a produção física e econômica advinda da floresta.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo e regimes de manejo

A área de estudo utilizada foi uma floresta localizada entre os municípios de General Carneiro e Bituruna – Paraná. A área é composta por 236 talhões de *Pinus taeda* e *Eucalyptus* sp., totalizando uma área de 2365,8 ha (Figura 1). Os talhões da área apresentam área média igual a 10,29 ha, com área basal média de 40,46 m²/ha e diâmetro quadrático médio igual a 20,49 cm. Os plantios apresentam idades de 1 a 15 anos, com média igual a 7,6 anos, distribuídos predominantemente nas classes de sítio II e III (70%).

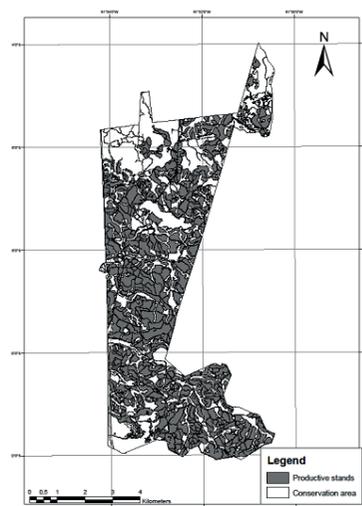


Figura 1 Mapa da área de estudo. A figura apresenta o mapa da área de estudo com talhões produtivos em cinza escuro e áreas de preservação em branco.

Figure 1 Map of the study area. The figure presents the map of the study area with the productive stands in grey and conservation areas in white.

Modelo de otimização

Para a construção do modelo matemático de otimização foi adotado um horizonte de planejamento de 16 anos, considerando apenas uma rotação, em regimes de manejo sem desbaste, com possibilidade de corte raso dos talhões até a idade de 20 anos. Aplicando os conceitos das abordagens ARM e URM em um modelo de planejamento florestal otimizado com objetivo de maximização do VPL, propôs-se a seguinte formulação, sendo: N: Número de talhões da floresta; P: Número de anos do horizonte de planejamento; c_{ij} : VPL gerado pelo talhão i caso seja colhido no ano j ; x_{ij}, x_{kj} : variável binária de decisão que assume valor 1 caso o talhão i ou k seja colhido no ano j ; v_{ij} : volume gerado pelo talhão i no ano j ; a_i : área do talhão i (ha); n_i : coeficiente que indica o número de talhões adjacentes ao talhão i ; $\delta(i)$: conjunto de talhões adjacentes ao talhão i ; $\lambda(i)$: bloco de talhões i com área superior à área limite; $w(i)$: número de talhões em $\lambda(i)$;

$$MaxZ = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P c_{ij} x_{ij} \quad [1]$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^P x_{ij} = 1; \quad \forall i \quad [2]$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \geq 0,9 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1}; \quad j = 2, \dots, P \quad [3]$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} x_{ij} \leq 1,1 \sum_{i=1}^N v_{i1} x_{i1}; \quad j = 2, \dots, P \quad [4]$$

URM:

$$\sum_{k \in \delta(i)} x_{kj} \leq n_i (1 - x_{ij}); \quad \forall i, j = 1, \dots, 10 \quad [5.1]$$

ARM

$$\sum_{i \in \lambda(i)} x_{ij} \leq w(i) - 1 \quad \forall \lambda(i), j = 1, \dots, 10 \quad [5.2]$$

(Adaptado de Carvajal et al., 2010)

$$x_{ij} \in \{0, 1\}; \quad \forall i, \forall j \quad [6]$$

A função objetivo do modelo apresentada em [1] maximiza o Valor Presente Líquido - VPL da floresta. No presente problema de otimização a taxa de desconto aplicada foi igual a 10% ao ano.

A restrição [2] garante que apenas um regime de manejo seja aplicado a cada talhão ao longo do horizonte de planejamento. As equações [3] e [4] são as restrições de equilíbrio do modelo e visam evitar grandes flutuações no suprimento de madeira ao longo do horizonte de planejamento (HP). No modelo em questão, foi estabelecido um limite de 10% de

variação do volume a cada ano do HP, em relação ao volume colhido no primeiro ano.

Tabela 1 Cenários testados. A tabela apresenta os 12 cenários testados no processo de otimização, indicando o número, nome e as restrições (número da equação) incluídas no modelo para cada cenário. Todos os cenários consideraram uma função objetivo de maximização do VPL.

Table 1 Tested scenarios. The table presents the 12 tested scenarios, indicating the number, name and the constraints (equation number) included in the model for each scenario. All scenarios considered a NPV maximization objective function.

Cenário	Nome	Restrições
1	Livre	2, 6
2	URM	2, 5.1, 6
3	ARM 40 ha	2, 5.2, 6
4	ARM 50 ha	2, 5.2, 6
5	ARM 60 ha	2, 5.2, 6
6	ARM 70 ha	2, 5.2, 6
7	Equilíbrio	2, 3, 4, 6
8	URM e equilíbrio	2, 3, 4, 5.1, 6
9	ARM 40 ha e equilíbrio	2, 3, 4, 5.2, 6
10	ARM 50 ha e equilíbrio	2, 3, 4, 5.2, 6
11	ARM 60 ha e equilíbrio	2, 3, 4, 5.2, 6
12	ARM 70 ha e equilíbrio	2, 3, 4, 5.2, 6

A restrição [5.1] representa o conjunto de restrições URM, garantindo que dois talhões adjacentes não sejam colhidos em um mesmo ano do HP. A restrição [5.2] representa o conjunto de restrições ARM, impondo que nenhum bloco com área superior à área limite seja colhido em um mesmo ano do HP. Foram testados cenários com diferentes valores para o limite de área, com objetivo de avaliar o efeito das mesmas sobre o volume e VPL da floresta. Foram incluídos no modelo conjuntos de restrições ARM para limites de área iguais a 40, 50, 60 e 70 ha, gerando ao todo 12 cenários (Tabela 1). Desta forma, para cada um destes cenários, quaisquer blocos contíguos de talhões com área superior ao limite são impedidos de serem colhidos em um mesmo ano do horizonte de planejamento. A restrição [6] garante que as variáveis x_{ij} assumam apenas valores binários.

Os cenários de planejamento foram gerados por meio do software Optimber-LP (OPTIMBER, 2012) e em seguida os modelos de otimização foram resolvidos por meio do software Gurobi 5.5 (GUROBI, 2015) em computador com processador Intel® Core™ Duo CPU 2,93 GHz e 4Mb de memória. O tempo limite de processamento estabelecido foi de 1.800 segundos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os resultados da otimização em termos de produção de madeira como uma média de todos os cenários. Considerando os cenários em que foi aplicada a restrição de equilíbrio, pode ser constatado que a mesma evitou a retirada de um grande volume de madeira no início do horizonte de planejamento e foi capaz de manter os níveis de produção durante o período considerado. Este cenário é desejável do ponto de vista da empresa florestal, visando garantir a continuidade de sua produção e evitar custos de oportunidade no caso de interrupções no processo produtivo devido à falta de madeira. Do ponto de vista do produtor florestal, a ocorrência de picos de produção também pode acarretar na impossibilidade de venda de toda a madeira produzida, resultando em perdas econômicas.

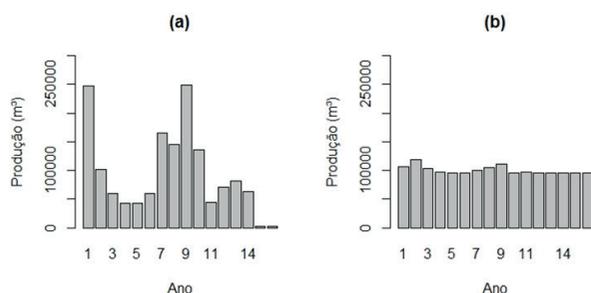


Figura 2 Produção anual de madeira com e sem restrições de equilíbrio. A figura apresenta o volume de madeira produzido a cada ano do horizonte de planejamento. A figura (a) apresenta o volume médio de madeira produzido a cada ano considerando os cenários 1 a 6, sem restrições de equilíbrio e a figura (b) exibe o volume médio de madeira produzido considerando os cenários 7 a 12, com restrições de equilíbrio.

Figure 2 Yearly wood production with and without wood flow constraints. The figure presents the wood volume produced in each year of the planning horizon. Figure (a) presents the average wood volume produced in scenarios 1 to 6, without wood flow constraints, and (b) exhibits the average wood volume produced considering scenarios 7 to 12, with wood flow constraints.

É possível observar na Figura 3 o agendamento espacial da colheita para cenários selecionados. A aplicação das restrições URM (Cenário 8) evitou a colheita de talhões adjacentes em um mesmo ano do horizonte de planejamento, causando uma dispersão na colheita dos talhões. Segundo Murray e Weintraub (2002), a modelagem URM é eficiente quando se objetiva apenas a diminuição da extensão da colheita, visando diminuir impactos ambientais. Entretanto, a dispersão causada

pelos restrições tem influência nos custos da colheita. Uma vez que os talhões a serem colhidos encontram-se dispersos, há a necessidade de uma maior movimentação das máquinas florestais entre os talhões, aumentando os custos. Adicionalmente, como estas restrições não consideram a área dos talhões, portanto ignorando o estoque de madeira presente em cada talhão, a sua aplicação pode ser onerosa para a manutenção do fluxo de madeira ao longo do horizonte de planejamento, uma vez que talhões vizinhos podem apresentar estoques substancialmente distintos.

Nos cenários em que foi aplicada a restrição ARM (Ex. Cenário 9), as áreas limite foram respeitadas. Com o aumento do limite de área de 40 para 70 ha, o agendamento da colheita dos talhões se aproximou da configuração obtida no cenário livre, consequência da flexibilização da restrição com o aumento da área limite.

A restrição de equilíbrio causou a dispersão dos talhões a serem colhidos (Cenário 7), comparados aos cenários em que a mesma não foi aplicada. A necessidade de manutenção do fluxo de madeira leva a uma distribuição das áreas de colheita ao longo do horizonte de planejamento. Vielma et al. (2007) obtiveram resultados semelhantes na aplicação de restrições de equilíbrio em uma floresta no norte da Califórnia. Segundo os autores, o efeito de fragmentação causado pela restrição de equilíbrio é explicado pelo fato de que com a maximização do VPL, se a taxa de desconto aplicada for maior do que a taxa de crescimento da floresta, as restrições de equilíbrio evitarão a realização do corte raso no maior número de talhões possíveis durante os períodos iniciais.

Com base nos resultados descritos na Tabela 2, foi possível constatar que a aplicação da restrição URM (Cenários 2 e 8) causou o maior efeito sobre a função objetivo de maximização do VPL, gerando uma redução de 3,37% sem a restrição de equilíbrio e 4,46% no caso em que a restrição de equilíbrio foi aplicada (Tabela 2). Gomide (2009), estudando uma área de 52 talhões no município de Caçapava (São Paulo), obteve uma redução de 3,74% no VPL e perdas volumétricas inferiores a 3% com a incorporação de restrições de adjacência URM ao modelo de planejamento. Binoti et al. (2012) obteve uma redução de 8% no VPL da floresta, incluindo restrições URM em um modelo de planejamento florestal para uma área com 135 talhões. Discrepâncias no impacto das restrições de adjacência podem estar relacionadas às características da área de estudo. Em áreas com número reduzido de adjacências por talhão os custos podem ser maiores, uma vez que há um menor número possível

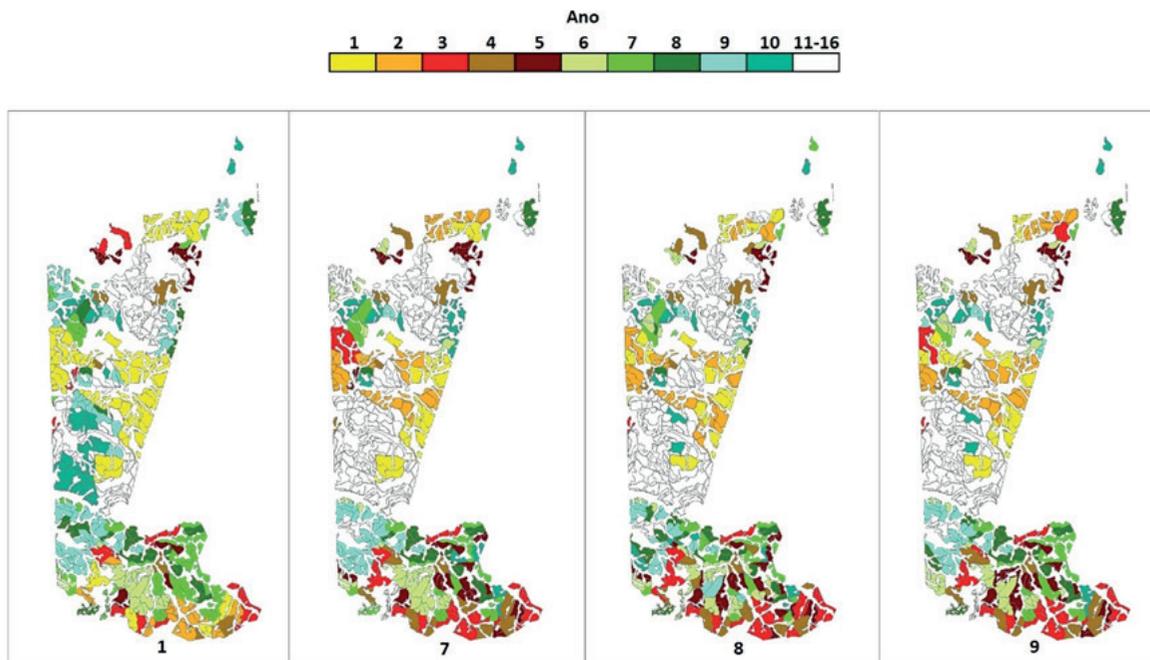


Figura 3 Agendamento espacial da colheita. As figuras apresentam os talhões agendados para colheita durante o período de inclusão de restrições de adjacência (anos 1 a 10) para os cenários 1, 7, 8 e 9.

Figure 3 Spatial harvest scheduling. The figures present the stands scheduled for harvesting during the period in which the adjacency constraints (years 1 to 10) were imposed, for scenarios 1, 7, 8 and 9.

de configurações de colheita. Assim, grande parte dos talhões pode ser colhida em períodos distintos do seu ótimo individual, aumentando os custos relacionados à restrição URM.

A aplicação da restrição ARM obteve um resultado mais eficiente se comparados à restrição URM. No caso mais restritivo, com área limite de 40 ha a perda de VPL foi de 1,16%, corroborando com resultados encontrados para problemas similares na literatura. Gomide et al. (2010) reportaram reduções no VPL de 2,1 a 2,4% com a aplicação da formulação ARM e 3,74% com a aplicação da formulação URM em um plantio de eucalipto composto por 52 talhões. Murray e Weintraub (2002) obtiveram valores para a abordagem ARM 16% superiores à abordagem URM. McDill e Manning (2011) apontam que a função objetivo teve valores superiores quando formulada com restrições ARM comparada aos valores obtidos com a formulação URM. Os autores ainda destacam que as diferenças podem ser substanciais, especialmente em florestas inequidâneas. Zhu et al. (2007) avaliaram duas áreas com 2942 e 5821 ha. Os resultados indicaram que a incorporação de restrições de adjacência gerou um decréscimo de 1 a 3,5% no Valor Presente da floresta para cada cenário. Conforme descrito por Murray e Weintraub (2002), a maior liberdade para seleção dos talhões a serem colhidos confere à abordagem a ARM a possibilidade de se obter

melhores resultados, se comparados à abordagem URM.

Considerando os resultados da Tabela 2, ainda foi possível observar que de maneira geral, o aumento do limite de área gerou um aumento no VPL. Murray et al. (2004) avaliaram o efeito de restrições ARM na floresta nacional El Dorado localizado no norte da Califórnia. Segundo os autores, o aumento da área limite é acompanhado por um acréscimo no número de blocos possíveis de colheita e um incremento no valor da função objetivo. O mesmo padrão foi observado em nosso estudo, com o incremento no VPL florestal, à medida que a área limite aumentou, flexibilizando a restrição de adjacência. Este comportamento decorre da maior flexibilidade para o agendamento da colheita quando a área limite foi aumentada, tornando o modelo menos restritivo e permitindo a aproximação da configuração obtida no cenário livre. Ao contrário do esperado, o VPL obtido no cenário 9, com limite igual a 70 ha foi inferior ao obtido no cenário 8, com limite igual a 60 ha. Este resultado decorre do fato do maior número de restrições no cenário 9, demandando maior tempo para o processamento do modelo. Como podemos observar o gap entre o ótimo relaxado e a melhor solução obtida foi igual a 0,05% no cenário 9 e 0,01% no cenário 8, portanto apresentando um resultado ligeiramente inferior, em termos do VPL devido ao gap com relação ao ótimo.

Tabela 2 Resultados da otimização para cada cenário. A tabela apresenta os principais resultados do processo de otimização, incluindo o VPL, a redução do VPL considerando o cenário livre, o número de restrições de adjacência, o tempo de resolução em segundos (Limite= 1.800 s) e o gap em relação ao ótimo.

Table 2 Optimization outcomes for each scenario. The table presents the main outcomes of the optimization process, including the NPV, the reduction on the NPV compared to the free scenario, the number of adjacency constraints, the solution time in seconds (Limite= 1.800 s) and the gap related to the optimum.

CENÁRIO	ADJACÊNCIA	VPL (R\$)	VARIAÇÃO (%)	NÚMERO DE RESTRIÇÕES DE ADJACÊNCIA	TEMPO DE RESOLUÇÃO (S)	GAP (%)
1	-	82.378.134,05	-	-	0,54	Ótimo
2	URM	79.689.160,42	-3,37	2.360	1,01	Ótimo
3	ARM 40	81.435.064,31	-1,16	31.670	1,34	Ótimo
4	ARM 50	81.958.263,98	-0,51	63.140	2,88	Ótimo
5	ARM 60	82.041.091,01	-0,41	125.110	5,91	Ótimo
6	ARM 70	82.143.186,76	-0,29	242.740	13,52	Ótimo
7	-	80.198.885,85	-2,64	-	Limite	0,01
8	URM	78.699.174,53	-4,46	2.360	Limite	0,02
9	ARM 40	79.873.095,9	-3,14	31.670	Limite	0,01
10	ARM 50	80.178.984,48	-2,66	63.140	Limite	0,02
11	ARM 60	80.190.949,23	-2,65	125.110	Limite	0,01
12	ARM 70	80.164.189,00	-2,68	242.740	Limite	0,05

As restrições de adjacência, além de terem efeito sobre os valores da função objetivo, causam um aumento significativo na complexidade do modelo de otimização. Com o aumento do limite de área, o número de restrições e o tempo de processamento cresceu exponencialmente (Tabela 2). Assim, m áreas com grande número de talhões pode ser necessária a aplicação de soluções heurísticas para a obtenção de respostas satisfatórias em tempos razoáveis de processamento. Goycoolea et al. (2009) avaliaram o efeito do aumento da área máxima de colheita sobre o número de restrições para uma floresta de 1.363 talhões. Segundo o autor o aumento da área máxima de colheita em 60% gerou um aumento de 500% no tamanho do modelo, em termos do número de restrições incluídas.

CONCLUSÕES

A inclusão de restrições de adjacência do tipo ARM e URM com critério de área máxima é uma opção viável para incluir questões ambientais relacionadas à abertura abrupta da cobertura florestal no planejamento da colheita de florestas plantadas. A abordagem ARM se mostra mais complexa que a abordagem URM, demandando algoritmos mais complexos para a formulação do modelo de planejamento e maior tempo de processamento para a resolução.

Os impactos causados pela inclusão de restrições de adjacência no modelo de planejamento florestal ao VPL apresentam reduções variando de 0,29 a 4,46%. Considerando a área relativamente pequena dos talhões, a abordagem ARM se mostra mais adequada ao permitir uma maior flexibilidade para a seleção dos talhões a serem colhidos durante o horizonte de planejamento e conseqüentemente um maior retorno econômico do investimento florestal.

REFERÊNCIAS

- 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*, v. 49(4), p. 1-18, 2015.
- BINOTI, D. H. B.; DA SILVA BINOTI, M. L. M.; LEITE, H. G.; GLERIANI, J. M.; CAMPOS, J. C. C. Regulation of even-aged forest with adjacency constraints. *Forest Policy and Economics*, v. 20, p. 49-57, 2012.
- BORGES, P. M.; I.; 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(5), p. 1-21, 2015.
- BOYLAND, M., NELSON, J., and BUNNELL, F.L. Creating zones for forest management: a simulated annealing approach. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 34, p. 1669–1682, 2004.

- CARVAJAL, R.; CONSTANTINO, M.; GOYCOOLEA, M.; VIELMA, J. P.; WEINTRAUB, A. Imposing connectivity constraints in forest harvest scheduling, não publicado, 2010. Disponível em: <http://www.mit.edu/~jvielma/publications/Imposing-Connectivity-Constraints.pdf>. Acesso: 12/03/2014.
- 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. D. An evaluation of the simulated annealing algorithm for solving the area-restricted harvest-scheduling model against optimal benchmarks. **Canadian Journal of Forest Research** v. 35, p. 2500-2509, 2005.
- DONG, L.; BETTINGER, P.; LIU, Z.; 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, 2015.
- GÓMEZ, T.; HERNÁNDEZ, M.; MOLINA, J.; LEÓN, M. A.; ALDANA, E.; CABALLERO, R. A multiobjective model for forest planning with adjacency constraints. **Annals of Operations Research**, v. 190(1), p. 75-92, 2011.
- GOMIDE, L. R. **Planejamento Florestal Espacial**. 2009. 235 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. 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, p. 449-460, 2013.
- GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Efeito das restrições espaciais de adjacência no planejamento florestal otimizado. **Floresta**, v. 40(3), p. 573-584, 2010.
- GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A.T.; BARAHONA, F.; WEINTRAUB, A. Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions: Exploring Exact Approaches. **Operations Research**, v.53, p. 490-500, 2005.
- GOYCOOLEA, M.; MURRAY, A. T.; VIELMA, J. P.; WEINTRAUB, A. Evaluating approaches for solving the area restriction model in harvest scheduling. **Forest Science**, v. 55, p. 149-165, 2009.
- GUROBI OPTIMIZATION, INC. **Gurobi Optimizer Reference Manual**. 2015 Disponível em: <http://www.gurobi.com>. Acesso: 23/11/2015.
- KAŠPAR, J.; MARUŠÁK, R.; VOPĚNKA, P. Comparison of two alternative optimization techniques for spatial harvest planning. **Scientia Agriculturae Bohemica**, v. 44, p. 90-96, 2013.
- KÖNNYÜ, N.; TÓTH, S. F. A cutting plane method for solving harvest scheduling models with area restrictions. **European Journal of Operational Research**, v. 228(1), p. 236-248, 2013.
- MCDILL, M. E.; REBAIN, S. A.; BRAZE, J. Harvest Scheduling with Area-Based Adjacency Constraints. **Forest Science**, v. 48(4), p. 631-642, 2002.
- MCDILL, M. E.; MANNING, P.J. Optimal parameter settings for solving harvest schedule models with adjacency constraints. **Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences**, v. 3, p. 0-10, 2011.
- MURRAY, A. T.; GOYCOOLEA, M.; WEINTRAUB, A. Incorporating average and maximum area restrictions in harvest scheduling models. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, p. 456-464, 2004.
- MURAY, A.; WEINTRAUB, A. Scale and Unit Specification Influences in Harvest Scheduling with Maximum Area Restrictions. **Forest Science**, v.48(4), p. 779-789, 2002.
- OPTIMBER OTIMIZAÇÃO E INFORMÁTICA LTDA. **Produtos**. 2013 Disponível em: <http://www.optimber.com.br/index.php/software/optimber-lp>. Acesso: 23/11/2015.
- SHAN, Y.; BETTINGER, P.; CIESZEWSKI, C.; WANG, W. Pitfalls and potential of particle swarm optimization for contemporary spatial forest planning. **Forest Systems**, v. 21(3), p. 468-480, 2012.
- 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(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(2), p. 157-176, 2013.
- VIELMA, J. P.; MURRAY, A. T.; RYAN, D. ; WEINTRAUB, A. Improving Computational Capabilities for Addressing Volume Constraints in Forest Harvest Scheduling Problems. **European Journal of Operational Research**, v. 176, p. 1246-1264, 2007.
- ZHU, J., BETTINGER, P.; Li, R. Additional insight into the performance of a new heuristic for solving spatially constrained forest planning problems. **Silva Fennica**, v. 41, p. 687-698, 2007.
- ZHU, J., BETTINGER, P. Assessment of Three Heuristics for Developing Large-Scale Spatial Forest Harvest Scheduling Plans. **Journal of Applied Sciences**, v. 8, p.

