

ESTRATIFICAÇÃO ESPACIAL DE COMPARTIMENTOS VIA METAHEURÍSTICA SIMULATED ANNEALING EM UNIDADES DE MANEJO FLORESTAL

Lucas Rezende Gomide

Universidade Federal de Lavras

Campus Universitário, Caixa Postal 3037, CEP 37200-000 Lavras/MG

lucasgomide@def.ufla.br

RESUMO

O estudo teve como objetivo avaliar o uso da metaheurística *simulated annealing* na resolução de problemas de P-mediana (capacitado e não capacitado), comparando seus resultados com o algoritmo *branch and bound*. Verificar ainda a estratificação espacial do talhão em compartimentos a serem usados no planejamento da atividade de colheita florestal. Os dados derivam de um projeto florestal contendo informações técnicas para a geração de 2.353 grids e 65 pilhas de armazenamento de madeira. Os resultados mostraram que a metaheurística *simulated annealing* pode ser empregada na estratificação espacial de compartimentos, em substituição a métodos determinísticos, por demandar menor tempo de processamento e apresentar baixo desvio do ótimo, ao se considerar o problema não capacitado. O problema capacitado carece de mais estudos e melhores estratégias de buscas, para garantir um menor ruído nos compartimentos gerados, já que o limite volumétrico imposto é uma opção viável e fundamental no planejamento operacional da atividade.

PALAVRAS CHAVE. Colheita Florestal, Reflorestamento, Programação linear inteira.

Área principal (AG&MA - PO na Agricultura e Meio Ambiente)

ABSTRACT

The study aimed to evaluate the use of simulated annealing metaheuristic to solve P-median problem (capacitated and non-capacitated) and comparing their results with the branch and bound algorithm. To analyze the spatial stratum of the stand into compartments to be applied for the forest harvesting planning. The data was obtained from a forest project which containing technical information to build 2353 grids and 65 storage piles of wood. The results showed that the simulated annealing metaheuristic can be used to define the spatial stratum of the stand into compartments and replace the deterministic methods, due to require shorter processing time and low deviation from optimal, when considering the non-capacitated problem. The capacitated problem needs further studies and better strategies to search, avoiding the noise effects of the created compartments, since the volume bounds is a viable option and crucial for the operational planning activity.

KEYWORDS. Forest harvest. Reforestment. Integer linear programming.

Main area (AG&MA - PO na Agricultura e Meio Ambiente)

1. Introdução

Atualmente, com o advento de novas tecnologias e o uso de métodos de auxílio a tomada de decisão, tem promovido melhorias na eficiência dos processos produtivos no setor florestal. Nessa linha, observa-se a integração entre sistema de informação geográfica e modelos de programação matemática, onde são exaustivamente aplicados na resolução de problemas de roteamento e transporte de madeira, bem como nos processos envolvendo a colheita florestal.

A colheita florestal pode ser definida como um conjunto de operações efetuadas no maciço florestal, que envolvem desde a extração da madeira (derrubada, desgalhamento e processamento ou traçamento) até a definição do local de armazenamento, para o transporte ao destino final. Devido à complexidade no número de operações, o uso de métodos e técnicas na colheita florestal faz-se necessário, reduzindo riscos de acidentes e a falta de matéria prima ao consumidor final. Além disso, pode-se citar a alocação de maquinário, adoção do melhor sistema de colheita, definição e dimensionamento dos múltiplos produtos de madeira, bem como a instalação de pátios de armazenamento de madeira, como parte das atribuições ligadas à atividade. As operações citadas exigem um planejamento acurado e ações efetivas para seu controle e monitoramento, sendo estas dispendiosas de recursos financeiros e humanos. Segundo a ABRAF (2012), os números do setor florestal para áreas reflorestadas refletem sua importância, ao empregar 5% da população economicamente ativa, participa de 19,2% do saldo da balança comercial brasileira, apresentando investimentos na ordem de 2,9 bilhões de reais para o ano de 2011, sendo deste total, 21,7% aplicados na área de transporte e colheita. Existindo ainda uma projeção de investimento na ordem de 7,9 bilhões de reais para os próximos anos no setor.

Nesse contexto, o planejamento operacional empregado na colheita florestal vem ganhando cada vez mais importância, cujo objetivo principal é reduzir os custos e aumentar a eficiência do sistema produtivo, tendo ainda um maior controle das atividades executadas. Por outro lado, com a expansão das unidades fabris e ampliação das fronteiras agrícolas, tem-se formado um cenário cada vez mais desafiador, buscando superar objetivos complexos. Esse panorama geralmente é representado por um problema matemático de grande dimensão, que exige um esforço computacional elevado, onde nem sempre é possível obter o ótimo via métodos determinísticos. Assim, surge a necessidade do uso de métodos aproximativos, como as metaheurísticas, principalmente quando a natureza do problema é combinatória. A análise combinatória foi considerada primordial em muitos ramos da ciência, auxiliando na evolução do conhecimento humano, como no caso da Pesquisa Operacional.

A metaheurística *simulated annealing* (SA), por sua vez, é comumente aplicada na resolução de problemas de otimização florestal, como encontrados nos trabalhos de Bettinger *et al.* (2002), Falcão e Borges (2003), Crowe e Nelson (2005), Gomide (2009), dentre outros. Essa metaheurística foi desenvolvida no início da década de 80 e segundo Goldstein e Waterman (1988) e Henderson *et al.* (2003), a mesma é um algoritmo típico de busca local, que realiza movimentos de busca baseado no algoritmo primário (*greedy*).

Mahmoud (2007) comenta que a ideia fundamental desse método é realizar movimentos através das iterações, rearranjando as moléculas do metal no estado líquido até o resfriamento. Assim, a energia gerada pelas moléculas corresponde à função de custo, que deve ser otimizada ao longo das iterações. Kirkpatrick *et al.* (1983) definem que o processo de *annealing* é guiado pelo critério de Metropolis, e por isso difere dos processos tradicionais de busca. O critério de Metropolis promove um controle na escolha das soluções, sendo assim, permite que o algoritmo não fique concentrado apenas em uma região do espaço de soluções, como ocorre nos algoritmos baseados em refinamento da solução. Então, a simulação de possíveis soluções é observada a cada iteração do algoritmo. Suman e Kumar (2006) comentam que a SA é uma técnica compacta e robusta e que apresenta excelentes soluções para problemas de otimização, em reduzido tempo computacional.

Dessa forma, o trabalho teve como objetivo avaliar o uso da metaheurística *simulated annealing* na resolução de problemas de P-mediana (capacitado e não capacitado), com foco na estratificação espacial de compartimentos dentro das unidades de manejo florestal, para a

operação de baldeio durante a colheita florestal. Complementarmente, comparar os resultados gerados pela metaheurística SA com o ótimo obtido via programação linear inteira (PLI), ao empregar o algoritmo *branch and bound*.

2. Material e métodos

2.1 Descrição do problema

O plano de suprimento de madeira, para atender o abastecimento de uma fábrica, está contido em três níveis de planejamento (estratégico, tático e operacional). A partir do planejamento estratégico gera-se um plano de corte, que se resume no agendamento das unidades de manejo (talhões) a serem colhidas ao longo dos anos. O reflexo dessa seleção de talhões, no nível operacional, a ser colhido, é a base para o planejamento da colheita florestal pelas equipes responsáveis. O processo se inicia com o conhecimento detalhado da área a ser colhida, no que se refere a produção volumétrica total (m^3/ha), acesso e condições das estradas, dimensão dos produtos, processamento da madeira, tipo de equipamento, forma de baldeio da madeira, bem como a coleta de informações locais relacionadas à declividade, tipo de solo, vegetação, presença de obstáculos, dentre outros. Atualmente, as informações de campo são convertidas em mapas temáticos, devidamente georreferenciados em coordenadas UTM. Após essa etapa, é dimensionada no campo a formação de compartimentos para o baldeio da madeira, seguindo critérios técnicos e os supracitados. No fim, via operação de baldeio são retiradas a madeira dos compartimentos formados, até um local adjacente à estrada, para o seu armazenamento em pilhas (Figura 1).

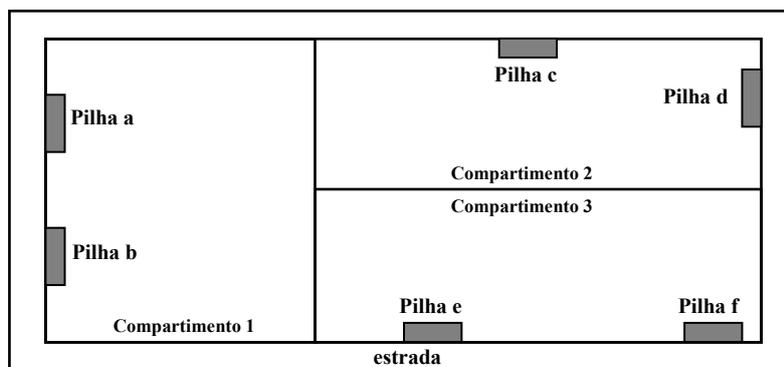


Figura 1: Desenho ilustrativo de um talhão hipotético dividido em compartimentos contendo pilhas habilitadas para o armazenamento de madeira.

O local para o armazenamento será preenchido por uma pilha de madeira, seguindo critérios técnicos para a sua instalação. Um dos cuidados na formação dos compartimentos é reduzir a intensa movimentação das máquinas e deslocamentos excessivos, sendo correlacionado diretamente com a ativação estratégica de certas pilhas. Portanto, além do aspecto econômico existe, há ainda a preocupação com o ambiente. Assim, surge a necessidade de se definir o local ótimo de instalação das pilhas de armazenamento de madeira, para em seguida formar os compartimentos relacionados à operação de baldeio. Devido às características do problema descrito, o mesmo se enquadra no problema intitulado de P-mediana.

2.2 Base de dados

O problema teste para a condução do presente estudo foi obtido de uma dada empresa florestal, contendo informações da produção volumétrica total de madeira ($5.280,4586 m^3$), área da unidade de manejo (22,1084 ha), aspectos topográficos do terreno (declividade), bem como informações técnicas de locais aptos para a instalação das pilhas. De posse dos dados foi

construído uma rede de grids (10x10m) e quantificado a volumetria presente na mesma, bem como sua coordenada central em UTM. O talhão 1 foi selecionado para o estudo, conforme Figura 2. Na sequência, demarcaram-se os possíveis locais aptos para a instalação das pilhas (25m de largura) e sua coordenada central. Posteriormente, empregou-se o cálculo da distância euclidiana, envolvendo a combinação entre todas as grids e pilhas, compondo uma matriz final. A capacidade volumétrica de armazenamento de madeira (problema capacitado) foi definida em 200 m³.

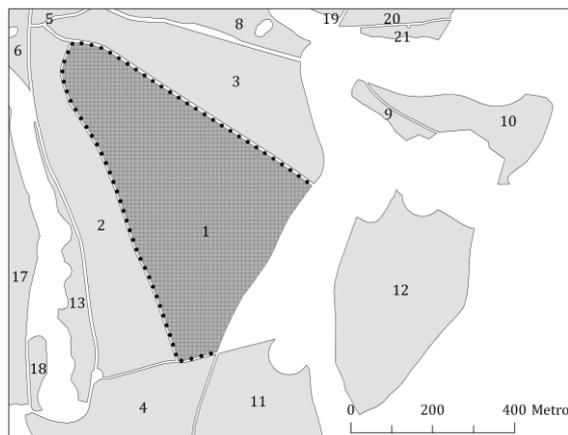


Figura 2: Exemplificação da unidade de manejo (talhão 1) dividida em grids (□) e contendo todas as pilhas (●) possíveis de serem habilitadas.

2.3 Modelo matemático de programação linear inteira (PLI)

O modelo matemático empregado para a resolução do problema descrito segue um conhecido problema combinatório, na Pesquisa Operacional, chamado de P-mediana, sendo empregado nas formas não capacitado e capacitado. A função objetivo (1) representa o somatório da combinação existente entre todas as grids i e pilhas j , cujo coeficiente foi obtido pelo cálculo da distância euclidiana (m). As restrições foram formadas pelas equações: (2) - define que a grid i deverá deslocar exclusivamente para uma única pilha j , (3) - ligação entre a grid i e pilha j , (4) - definição do número de pilhas a serem ativadas, (5) - capacidade máxima de armazenamento de madeira (200m³) e (6) - restrição envolvendo o uso de variáveis de binária {0, 1} no modelo de programação linear inteira. Além disso, tem-se que, X_{ij} = Variável de decisão binária {0, 1} do modelo matemático empregada para deslocar a madeira presente na grid i para a pilha de armazenamento de madeira j ; Y_j = Variável de decisão binária {0, 1} empregada para ativar a pilha j ; C_{ij} = Custo de deslocamento em metros gerado pelo cálculo da distância euclidiana entre a grid i e a pilha j ; V_i = Volume total de madeira (m³) presente na grid i e V_j = Capacidade total de armazenamento de madeira (m³) na pilha j ; NP = Número de pilhas a serem habilitadas.

Função Objetivo:

$$\text{MIN } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 1, \forall j \quad (2)$$

$$X_{ij} \leq Y_j, \forall i, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^M Y_j = NP, \forall j \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n V_i X_{ij} \leq V_j, \forall_j \quad (5)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, Y_i \in \{0,1\}, \forall_i, \forall_j \quad (6)$$

Assim, resumidamente tem-se o modelo capacitado formado pelas equações de (1) a (6), já para o modelo não capacitado foi removido a equação (5), ambos formulados no software LINGO (*Language for Interactive General Optimizer*) versão 13.0. O número total de pilhas a serem habilitadas foi estimado pela razão entre volume total de madeira presente no talhão, pelo volume máximo de armazenamento de madeira na pilha, cujo resultado foi acrescido de mais uma unidade como opção de folga.

2.4 Simulated annealing

A programação da metaheurística *Simulated annealing* foi realizada na sua forma tradicional (Figura 3), conforme proposta por Kirkpatrick *et al.* (1983), e envolveu basicamente um conjunto de parâmetros, como uma função de resfriamento $T_i = T_{(i-1)} \cdot \alpha$ ($\alpha = 90\%$), a vizinhança de busca (20%) e da temperatura inicial (1000) e final (0) do sistema. Devido a natureza do problema, envolvendo variáveis de decisão binária $\{0,1\}$, que ativa a ligação entre uma grid i e a pilha j para o armazenamento de madeira (Figura 4). Definiu-se como regra, na formação de cada solução, um sorteio das pilhas j a serem ativadas, conforme definido previamente. Na sequência, foram sorteadas e direcionadas às pilhas j , as grids i mais próximas, ou seja, de menor deslocamento mensurado pela distância euclidiana.

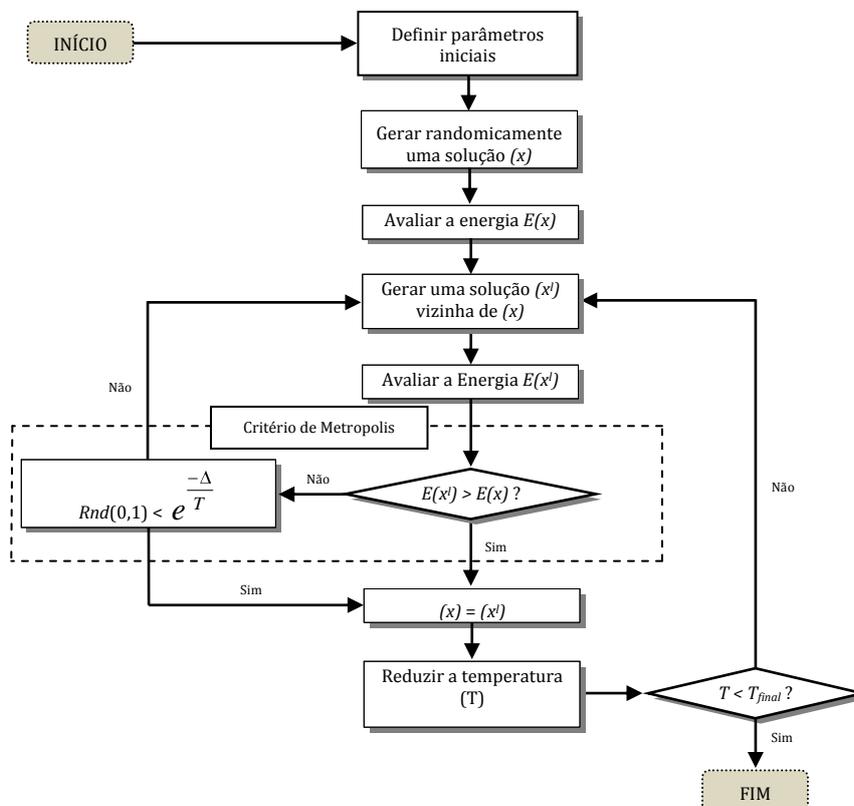


Figura 3: Fluxograma de funcionamento da metaheurística simulated annealing.

Um sorteio foi realizado para evitar tendenciosidade do processo, principalmente para o problema capacitado. Nesse caso, cada pilha j recebia um número limitado de grid i , conforme capacidade volumétrica de armazenamento (m^3) de madeira, ou seja, se sua capacidade já estava

completa, a mesma não recebia mais madeira originária da grid i sorteada, sendo direcionada para a próxima pilha j de menor distância. A metaheurística foi implementada no *Visual Basic*[®] versão 6.0 *Enterprise* da *Microsoft*[®] e processada 50 vezes por modelo testado (capacitado e não capacitado).

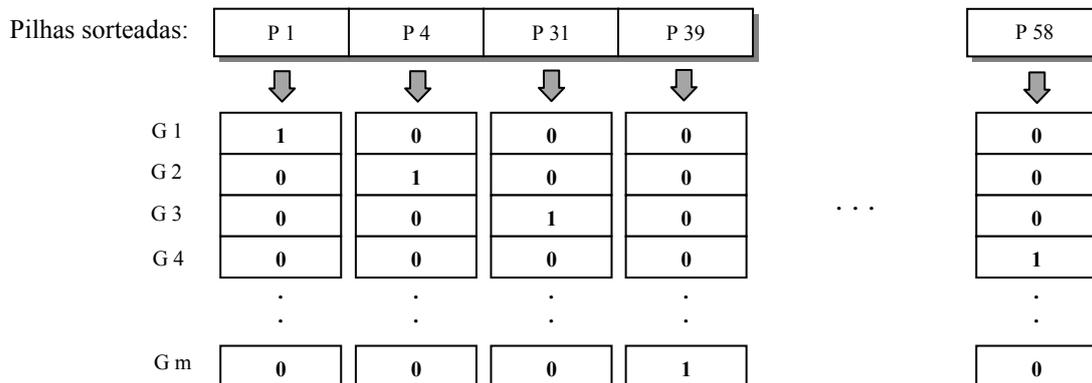


Figura 4: Exemplificação da codificação binária {0, 1} de ativação da grid (G) e pilha (P) utilizada na metaheurística *simulated annealing*.

2.5 Avaliações dos resultados e comparações

Um estudo comparativo entre o resultado gerado pela metaheurística SA e a programação linear inteira foi realizado, após o processamento dos modelos, onde foram comparados tempos de processamento, valor da função objetivo e de energia, bem como as relações entre pilhas j habilitadas e grids i nos dois métodos de resolução. Mapas foram gerados para verificar a qualidade na formação dos compartimentos dentro do talhão. No caso da metaheurística foram avaliados ainda o desvio do ótimo, a solução média, bem como a pior e melhor solução gerada por tipo de modelo. Os modelos foram processados em um computador com processador Intel[®] Core™ i3-2100 de 3.10 MHz e 8 Gb de memória RAM.

3. Resultados e Discussão

Os processamentos dos modelos matemáticos demonstraram que existe um grau de dificuldade em se obter a resposta exata, quando são introduzidas as restrições de capacidade de armazenamento de madeira, em cada pilha. Essa tendência também foi observada, ao se empregar o método aproximativo para a obtenção das respostas, conforme apresentado na Tabela 1.

O grau de dificuldade mencionado está relacionando ao tempo de processamento dos modelos matemáticos, ou seja, o problema não capacitado exigiu 420 segundos, contra 76.660 segundos para o capacitado. A metaheurística SA exigiu uma maior demanda de tempo para a obtenção da solução aproximada no problema capacitado, ao se comparar com o problema não capacitado, como ainda gerou maiores desvios frente ao ótimo. Além disso, a amplitude (pior e a melhor solução) após 50 repetições foi menor para o problema não capacitado.

Al-khedhairi (2008) trabalhando com a mesma metaheurística em 40 problemas não capacitados obteve respostas próxima do ótimo, com desvio máximo frente ao ótimo de 18,8% e processamento de 248 segundos, conseguindo ainda êxito em 33 cenários ao se igualar com o ótimo. Os problemas abordados pelo autor abrangiam de 500 a 98.000 variáveis de decisão. No presente estudo, o desvio máximo da solução ótima foi próximo de 4,16% (não capacitado) e 124,02% (capacitado), sendo esses inferiores ao obtido por Al-khedhairi (2008).

Avaliando tecnicamente os resultados gerados pelos dois tipos de modelos, e independente do método empregado, percebeu-se que há a formação de compartimentos bem definidos no problema não capacitado, tendendo a piorar com o aumento na largura do talhão no problema capacitado via PLI, ou seja, maior número de grids disponíveis para a realização das trocas. Essa lógica fica mais clara observando os mapas derivados de seus resultados, conforme Figura 5.

Tabela 1: Resultado obtido pelo processamento dos modelos testados utilizando a programação linear inteira (PLI) e a metaheurística *simulated annealing* (SA).

Tipo do problema	Método	Número de variáveis de decisão	Número de restrições	Função (m)	Desvio do ótimo (%)	Tempo (s)
Não capacitado	PLI	153.010	155.300	199.831	-	420
	SA ¹	-	-	202.923	1,55	261
	SA ²	-	-	205.805	2,99	283
	SA ³	-	-	208.143	4,16	357
Capacitado	PLI	153.010	157.653	208.109*	-	76.660*
	SA ¹	-	-	243.861	17,18	309
	SA ²	-	-	338.669	62,74	305
	SA ³	-	-	466.201	124,02	303

Em que: PLI - programação linear inteira, SA - *simulated annealing*, ¹ - melhor solução obtida, ² - solução média, ³ - pior solução obtida e * - solução apresentada após 76.660 segundos de processamento via *branch and bound*.

Uma comparação visual entre os mapas gerados (Figura 5a e 5b), pelos métodos de resolução testados no problema não capacitado, deixa claro que a metaheurística SA apresenta um grande potencial de uso, não só pelo baixo desvio frente ao ótimo e reduzido tempo de processamento, mas como ainda pela semelhança na formação dos compartimentos dentro do talhão. Entretanto, ao considerar o problema capacitado, esta lógica não foi verdadeira, pois os compartimentos não ficaram claros visualmente (Figura 5c e 5d), devido à presença de ruídos. Os ruídos podem ser classificados como grids que deveriam ser agrupadas em determinadas pilhas, para tornar o compartimento uniforme, seguindo um comportamento similar ao problema não capacitado. Essa tendência esperada não é possível teoricamente, pois o peso do volume de madeira de cada grid sempre será um fator restritivo a esse processo, conforme observado na solução apresentada pela PLI. Além disso, constata-se na prática que as grids nem sempre terão tamanhos idênticos, em virtude da forma do talhão, que não obedece a uma figura geométrica perfeita e regular.

A natureza desuniforme dos compartimentos, em problemas capacitados, está associada à hipótese de um processo randômico, onde esse efeito é propagado durante a criação de um vetor contendo todas as grids. Esse vetor é formado por uma lista abrangendo todas as grids *i* do talhão, porém não ordenados numericamente pelas coordenadas geográficas, ou seja, sendo totalmente aleatória sua sequência. Assim, durante o processo de consolidação da estratégia para a realização das buscas, a mesma se sustentou em disputas a serem realizadas entre as pilhas *j*, pela grids *i* em análise, ganhando a disputa, aquela pilha *j* com menor distância euclidiana. Ressaltando ainda que essa estratégia não faz sentido em problemas não capacitados, pois sempre as grids serão conduzidas às pilhas mais próximas (menor distância euclidiana), seguindo apenas o processo aleatório de seleção das pilhas a serem habilitadas. Por outro lado, ao se introduzir uma capacidade máxima de armazenamento de madeira nas pilhas, esse controle promoveu ruídos ao longo do

preenchimento volumétrico das pilhas, ao se deslocar pelo vetor. Assim, as pilhas que já possuíam saturação volumétrica por madeira saíam da disputa, mesmo a grid i em análise, apresentando a menor distância euclidiana do conjunto de pilhas j em disputa. Logo, a metaheurística SA tinha que trabalhar diretamente em dois processos randômicos, sendo o primeiro ligado a formação da lista de grids a serem disputadas e o segundo, relacionado à ativação das pilhas que se alteravam 20% na vizinhança de busca a cada iteração.

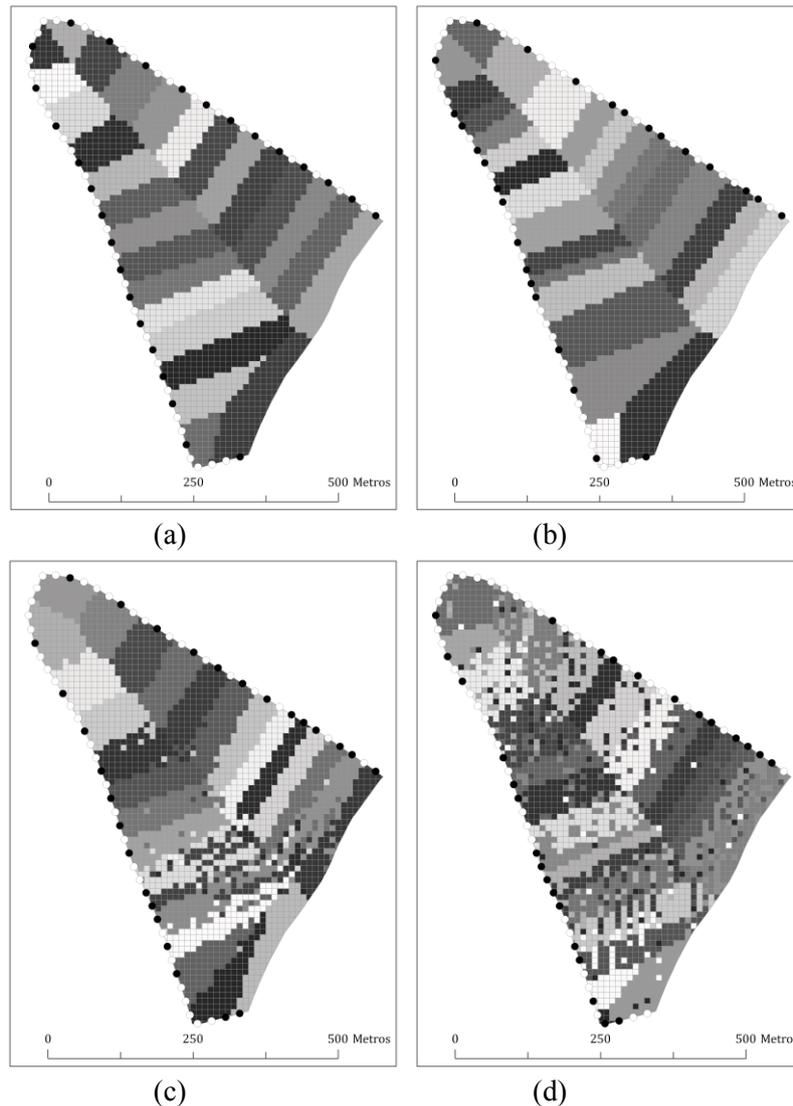


Figura 5. Mapas comparativos dos resultados gerados pelos métodos testados envolvendo o problema não capacitado: (a) PLI e (b) SA, e capacitado: (c) PLI e (d) SA na estratificação espacial da unidade de manejo para a operação de baldeio.

Entretanto, as pilhas adjacentes podem ser perfeitamente agrupadas em uma única e contínua pilha de armazenamento de madeira, até certo limite de comprimento, para melhorar a formação dos compartimentos (Figura 6) e remover o efeito do ruído. Essa lógica traz ganhos ao mapa final ligado ao planejamento operacional da atividade de baldeio. Outra estratégia é aumentar a capacidade volumétrica de armazenamento de madeira pelas pilhas, para reduzir ou evitar os ruídos.

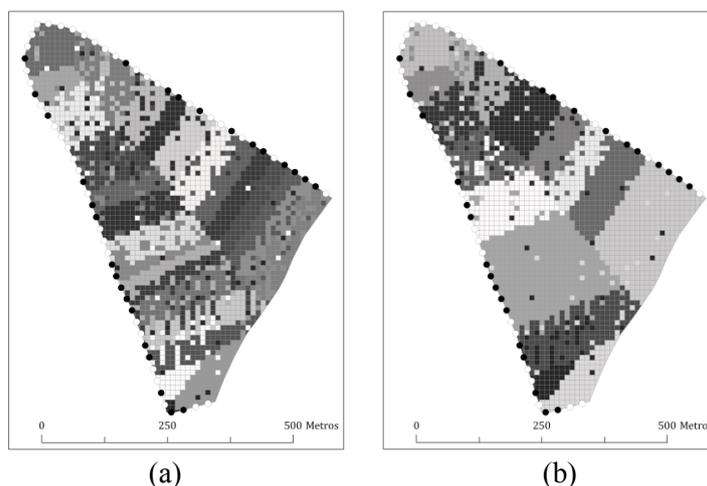


Figura 6. Mapas contendo o pós-processamento dos resultados gerados pela metaheurística SA envolvendo o problema capacitado, sendo (a) - sem agrupamento de pilhas adjacentes e (b) - com agrupamento.

Um ponto importante no planejamento operacional da atividade é um equilíbrio entre compartimentos bem definidos e sem ruídos, com uma capacidade volumétrica de armazenamento de madeira respeitada. Nesse caso, observando a Figura 7 percebe-se que o problema capacitado atende parcialmente os postulados, não deixando pilhas com volume superior a 200m^3 de madeira.

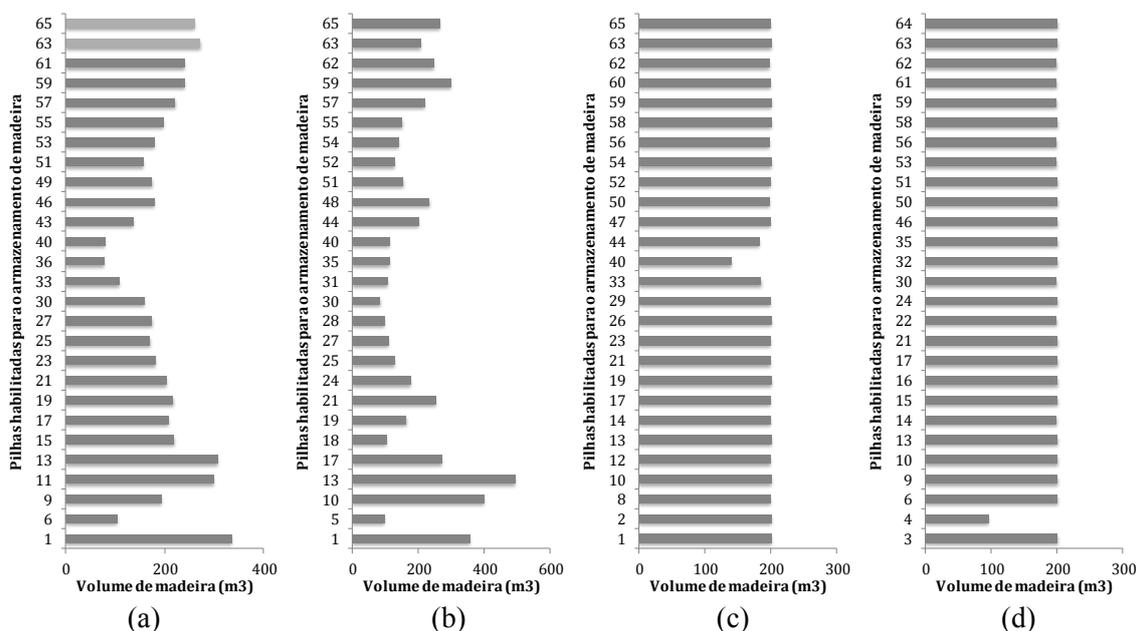


Figura 7: Volume total destinado às pilhas de armazenamento de madeira considerando os dois tipos de problema, o não capacitado: (a) PLI e (b) SA, e capacitado: (c) PLI e (d) SA.

O número de pilhas de armazenamento de madeira habilitadas pelo método aproximado chegou a 55,50% de igualdade com o método exato, considerando o problema não capacitado e 40,74% para o problema capacitado. Além disso, na grande maioria, as pilhas foram adjacente às habilitadas pelo método exato, nos dois tipos de problema.

4. Conclusões

A metaheurística *simulated annealing* pode ser empregada na estratificação espacial de compartimentos, destinados ao baldeio de madeira nas unidades de manejo florestal, em substituição a métodos determinísticos (algoritmo *branch and bound*) por demandar menor tempo de processamento e apresentar baixo desvio do ótimo, ao se considerar o problema não capacitado. O problema capacitado carece de mais estudos e melhores estratégias de buscas, para garantir um menor ruído nos compartimentos gerados, já que o limite volumétrico imposto é uma opção viável e fundamental no planejamento operacional da atividade.

5. Agradecimentos

O autor agradece a FAPEMIG pelo apoio financeiro.

6. Referências

- ABRAF.** Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011. ABRAF. Brasília: 2012. 150p.
- Al-Khedhairi, A.** Simulated Annealing Metaheuristic for Solving *P*-Median Problem. *Int. J. Contemp. Math. Sciences*, Vol. 3, 2008, no. 28, 1357 – 1365.
- Bettinger, P., Graetz, D., Boston, K., Sessions, J., Chung, W.** Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. *Silva Fennica*, Finland, v.36, n.2, p. 561-584, 2002.
- Crowe, K. A., 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*, Canada, v.35, n.10, p.2500-2509, 2005.
- Falcão, A. O., Borges, J. G.** Heurísticas para a integração de níveis estratégico e operacional da gestão florestal em problemas de grande dimensão. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n.63, p.13-23. 2003.
- Goldstein, L., Waterman, M.** Neighborhood size in the simulated annealing algorithm. *American journal of mathematical and management sciences*, USA, v.8, n.4, p.409-423, 1988.
- Gomide, L. R.,** Planejamento florestal espacial. Tese doutorado. UFPR, Curitiba. 2009. 256p.
- Henderson, D., Jacobson, S. H.; Johnson, A. W.** The Theory and Practice of Simulated Annealing. p.287-319. In: GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. (Eds.) *Handbook of metaheuristics*. Kluwer. 2003. p.557.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D.; Vecchi, M. P.** Optimization by simulated annealing. *Science*, usa, v. 220, n.4598, p.671-680, 1983.
- Mahmoud, T. M.** A Genetic and Simulated Annealing Based Algorithms for Solving the Flow Assignment Problem in Computer Networks. *International Journal of Electronics, Circuits and Systems*, v.1, n. 2, p.128-134, 2007.
- Suman, B, Kumar, P.** A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization. *Journal of the Operational Research Society*, United Kingdom, v.57, n.10, p.1143-1160, 2006.