

## Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e climáticas

Optimized harvest scheduling in eucalyptus plantations under operational, spatial and climatic constraints

José Rodrigo Banhara<sup>1</sup>, Luiz Carlos Estraviz Rodriguez<sup>2</sup>,  
Fernando Seixas<sup>2</sup>, José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira<sup>3</sup>,  
Lana Mirian Santos da Silva<sup>4</sup>, Silvana Ribeiro Nobre<sup>5</sup> e Andrew Cogswell<sup>6</sup>

### Resumo

A representação da preocupação com a sustentabilidade nos empreendimentos florestais para a elaboração dos planos de manejo, em relação aos aspectos ambientais, sociais e econômicos, atribuiu maior grau de detalhamento nas análises e compreensão de suas interações para prevenir possíveis impactos futuros. Entretanto, esse detalhamento, representado pelo planejamento em níveis tático e operacional, muitas vezes é elaborado através de métodos que podem apresentar alto grau de risco relacionado à ocorrência de soluções não realistas, prejudicando o processo de tomada de decisão. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo aprimorar as técnicas de planejamento operacional de colheita, através da elaboração de um modelo de programação linear inteira mista com minimização de desvios de metas; avaliar esse modelo em diferentes cenários sujeitos à ampliação da capacidade operacional, restrições ambientais e de abastecimento, além da incorporação de limites de deslocamento espacial da frente de colheita ao longo dos períodos de avaliação, para uma empresa usada como estudo de caso. Como resultado, foi selecionado um conjunto de indicadores de desempenho para a avaliação dos itens considerados no modelo, bem como suas interações, além da comparação dos cenários com os resultados efetivamente verificados pela empresa para cada um desses indicadores. O estudo mostra que é possível elaborar um modelo de programação linear capaz de representar o planejamento operacional de colheita, além de incorporar aspectos produtivos, ambientais e de abastecimento. A comparação dos resultados gerados pelo modelo nos diferentes cenários com os resultados obtidos pela empresa no período de análise mostrou a possibilidade de melhora na qualidade das soluções ao fazer uso das técnicas de programação linear e a vantagem da utilização de técnicas de planejamento mais holísticas.

**Palavras-Chave:** Planejamento de colheita, Ampliação da capacidade operacional, Restrição ambiental, Restrição de abastecimento, Programação por metas

### Abstract

The representation of sustainability concerns in industrial forests management plans, in relation to environmental, social and economic aspects, involve a great amount of details when analyzing and understanding the interaction among these aspects to reduce possible future impacts. At the tactical and operational planning levels, methods based on generic assumptions usually provide non-realistic solutions, impairing the decision making process. This study is aimed at improving current operational harvesting planning techniques, through the development of a mixed integer goal programming model. This allows the evaluation of different scenarios, subject to environmental and supply constraints, increase of operational capacity, and the spatial consequences of dispatching harvest crews to certain distances over the evaluation period. As

<sup>1</sup>Mestre em Recursos Florestais pelo Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo - Av. Pádua Dias, 11 - Piracicaba, SP - 13418-900 - E-mail: [jbanhara@gmail.com](mailto:jbanhara@gmail.com)

<sup>2</sup>Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo - Av. Pádua Dias, 11 - Piracicaba, SP - 13418-900 - E-mail: [luiz.estraviz@esalq.usp.br](mailto:luiz.estraviz@esalq.usp.br); [fseixas@esalq.usp.br](mailto:fseixas@esalq.usp.br)

<sup>3</sup>Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Cerrados) - SQN 405 - Bloco I - Apto 307 - Asa Norte - Brasília, DF - 70846-090 - E-mail: [jose.moreira@cpac.embrapa.br](mailto:jose.moreira@cpac.embrapa.br)

<sup>4</sup>Mestre em Recursos Florestais - Gerente Regional de Operações Florestais da Savcor Forest - Av. João Guilhermino, 261 - São José dos Campos, SP - 12210-131 - E-mail: [lane.silva@savcor.com](mailto:lane.silva@savcor.com)

<sup>5</sup>Mestre em Recursos Florestais - Diretora de Soluções da Savcor Forest - Av. João Guilhermino, 261 - São José dos Campos, SP - 12210-131 - E-mail: [silvana.nobre@savcor.com](mailto:silvana.nobre@savcor.com)

<sup>6</sup>Diretor de Treinamentos da Remsoft - 160-77 Westmorland St. Fredericton, New Brunswick, Canada E3B 6Z3 - E-mail: [andrew@remsoft.com](mailto:andrew@remsoft.com)

a result, a set of performance indicators was selected to evaluate all optimal solutions provided to different possible scenarios and combinations of these scenarios, and to compare these outcomes with the real results observed by the mill in the study case area. Results showed that it is possible to elaborate a linear programming model that adequately represents harvesting limitations, production aspects and environmental and supply constraints. The comparison involving the evaluated scenarios and the real observed results showed the advantage of using more holistic approaches and that it is possible to improve the quality of the planning recommendations using linear programming techniques.

**Keywords:** Harvest scheduling, Forest planning, Operational capacity, Environmental constraints, Supply constraints, Goal programming

## INTRODUÇÃO

Como uma das principais etapas do processo de tomada de decisão, o planejamento florestal, organizado de forma hierárquica, busca analisar as possíveis alternativas disponíveis para elaborar os planos de manejo de longo prazo, bem como estabelecer as metas a serem atendidas em médio e curto prazo. Esse processo é organizado em três níveis hierárquicos, estratégico, tático e operacional, os quais se diferenciam pelo escopo e atividades específicas. Os objetivos e planos, gerados em cada nível, devem ser consistentes e apoiados nos demais níveis, tornando-se mais específicos e envolvendo períodos de tempo menores à medida que o planejamento caminha do nível estratégico para o operacional (BATEMAN e SNELL, 1998; BASKENT e KELES, 2005).

Um aspecto importante, ocorrente a partir do planejamento tático, refere-se à inclusão de restrições espaciais. Essas restrições representam limitações físicas para a operação de colheita ou questões ambientais. Nesse contexto, a escolha de um determinado talhão para colheita, ou não, depende da seleção de talhões vizinhos em períodos anteriores, sendo considerada, desta forma, a adjacência entre os talhões (MITCHEL, 2004; SESSIONS e BETTINGER, 2001).

Dentre os níveis de planejamento, na maioria dos empreendimentos florestais, as operações vinculadas ao abastecimento de um determinado centro processador, são consideradas como as mais dispendiosas de todo o processo de produção florestal (VIERA, 2004). Dentre essas operações, destaca-se a colheita florestal, a qual pode ser considerada, de acordo com Machado *et al.* (2008), como a parte mais importante do manejo florestal, sob o ponto de vista técnico-econômico.

Para o planejamento eficiente dessa operação, os principais aspectos a serem considerados em seu planejamento podem ser classificados em aspectos econômicos, operacionais, ambientais e sociais. Os aspectos econômicos referem-se principalmente à definição dos custos opera-

cionais de cada equipamento a ser utilizado. Os aspectos operacionais referem-se à avaliação de fatores técnicos (MACHADO e LOPES, 2008), além da análise da infra-estrutura existente e a necessidade de novas aquisições para renovação ou ampliação de frota e análise da necessidade de contratação de serviços terceirizados (VIERA, 2004). Já, os aspectos ambientais se referem principalmente à análise de fatores que podem influenciar na ocorrência de impactos quanto à compactação e erosão do solo (MACHADO e LOPES, 2008; SEIXAS e MAGRO, 1998).

Apesar das preocupações supracitadas, os métodos mais comuns para o planejamento de colheita, principalmente nos níveis hierárquicos tático e operacional, segundo Machado e Lopes (2008) podem ser classificados como: método imitativo, onde se busca seguir fielmente exemplos em demais empreendimentos; método de tentativa, buscando-se associar as situações atuais somente com suas experiências passadas, correndo o risco de, em situações inéditas, basear-se somente em sua intuição; método científico, apoiado em condições lógicas, baseados em dados coletados em situações reais e extrapolados para novas situações.

Para auxiliar na elaboração de planos operacionais realistas, torna-se necessário o uso de métodos científicos de análise, destaca-se os pertencentes a uma área da ciência denominada pesquisa operacional, em especial as técnicas de programação linear. Esse método matemático é bastante utilizado em "situações de tomadas de decisão" que necessita a escolha de uma das opções, dentre muitas. Essa técnica pode ser aplicada em problemas que permitem a definição de um objetivo em termos quantitativos (RODRIGUEZ, 1987).

Uma importante característica das técnicas de programação linear se refere à avaliação de apenas um objetivo principal, com a possibilidade de haver objetivos indiretamente representados por restrições. Essa característica, em muitos casos, pode ser considerada rígida para aplicações reais, além de tornar a reso-

lução do problema inviável. Para representar maior flexibilidade na avaliação de soluções e tornar possível a incorporação de distintos objetivos ao modelo, sem comprometer a estrutura linear, pode-se fazer uso da técnica de programação por metas (BUONGIORNO e GILLESS, 2003). Exemplos de aplicações dessas técnicas em plantações florestais são apresentados nos estudos de Balteiro e Romero (1998) e Rodriguez e Borges (1999).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo aprimorar as técnicas de planejamento operacional de colheita em plantios de eucalipto, através da elaboração um modelo envolvendo as técnicas de programação linear inteira mista e programação por metas sob diferentes restrições operacionais, espaciais e ambientais, além da comparação dos resultados gerados com os níveis de produção e demandas operacionais efetivamente verificados durante os períodos de avaliação.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

Foi utilizada como objeto deste estudo uma empresa florestal produtora de celulose no Uruguai (Botnia/Forestal Oriental), localizada entre as coordenadas geográficas  $32^{\circ}17'27,67''$  a  $32^{\circ}40'19,80''$  S de latitude e  $57^{\circ}2'27,26''$  a  $57^{\circ}44'36,81''$  W de longitude, totalizando uma área de estudo de aproximadamente 5.311 ha. Para efeito deste estudo se considerou a informação disponível para três períodos consecutivos de colheita: o primeiro referente ao período de 07/2005 a 06/2006, o segundo de 07/2006 a 06/2007 e o terceiro de 07/2007 a 06/2008. Além disso, foram utilizados os dados referentes à curva de produção dos plantios, curva de densidade das espécies plantadas, custos e rendimentos para as atividades de corte e extração florestal, tanto para equipes próprias quanto terceirizadas, preço de venda da madeira e balanço hídrico sequencial mensal.

Para a efetiva identificação de locais onde a operação de colheita causa danos ambientais, dependendo da época do ano, a área de estudo foi classificada em nove classes de relevo constituídas pela combinação da elevação (de 56 a 137 m) com a declividade do terreno (de 0 a 4 %). Com a indisponibilidade de um mapeamento detalhado de solos, foi somente considerado que os locais mais expostos a danos ambientais eram aqueles situados sob condições de baixa elevação, baixa declividade e propensos a apresenta-

rem excedente hídrico em determinadas épocas do ano. Também, como pressuposto importante deste estudo, foi definida uma ordem espacial para direcionamento da frente de colheita a cada trimestre, conforme definida por Baskent e Keles (2005) como sendo uma abordagem exógena para incorporação de requerimentos espaciais no processo de planejamento florestal.

Ressalta-se que, tanto a seleção das áreas de potenciais riscos ambientais para a operação de colheita quanto o direcionamento da frente de colheita por trimestre são contabilizadas no modelo matemático com o apoio de um gerador de matrizes.

### Sistema de colheita florestal

Cabe destacar que o sistema utilizado representado para a colheita, tanto por equipes próprias quanto por terceirizadas, foi o sistema de toras curtas. As máquinas utilizadas para representar as atividades de corte e extração para equipes próprias foram harvester e forwarder, respectivamente. As máquinas utilizadas para representar as atividades de corte e extração para equipes terceirizadas foram motosserra e trator agrícola, respectivamente.

### Modelo proposto

Para a realização deste estudo foi proposto um modelo matemático padrão, utilizando-se a programação linear inteira mista (MIP), seguindo a formulação de modelo tipo II (JOHNSON E SCHEURMANN, 1977) para sequenciamento mensal das operações de colheita dos talhões selecionados para corte pelo planejamento estratégico. A formulação desse modelo, bem como suas variações, foi apoiada por um gerador de matrizes (REMSOFT, 2008) e solver (MOSEK, 2008).

Os índices utilizados no modelo padrão são:  $i$  = conjunto de talhões a serem colhidos, sendo  $i = 1, \dots, T$ ;  
 $j, k$  = períodos mensais de planejamento, sendo  $j, k = 1, \dots, J$  e  $j \leq k$ ;  
 $m$  = equipe de colheita própria, sendo  $m = 1, \dots, M$ .

O problema é formulado de forma a maximizar a receita líquida da operação. Mais especificamente, maximiza-se a receita bruta total menos o custo total representado pela soma das despesas com o corte e extração feito por equipes próprias e com a somatória das penalidades de não alcance da meta referente à demanda mensal.

**Cenário 1 – Modelo padrão:** a função objetivo adotada neste estudo é apresentada a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J \sum_{m=1}^M (Rb_{jk} - Cb_{jk}) Y_{jkm} - \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M Cc_{ij} X_{ijm} - \sum_{i=1}^T T_i Q_i - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M B_j U_{jm} - \\ & \sum_{k=j}^J (wI_k^- DI_k^- + wI_k^+ DI_k^+) \quad (1) \end{aligned}$$

Onde:

$X_{ijm}$  = área a ser cortada no talhão  $i$  no período  $j$  pela equipe  $m$ , em ha;

$Y_{jkm}$  = área a ser realizada a extração no período  $k$  em áreas cortadas no período  $j$  pela equipe  $m$ , em ha;

$Rb_{jk}$  = valor presente da receita bruta obtida com a extração de madeira no período  $k$  em áreas cortadas no período  $j$ , em US\$/ha;

$Cb_{jk}$  = valor presente dos custos de extração da madeira no período  $k$  em áreas cortadas no período  $j$ , em US\$/ha;

$Cc_{ij}$  = valor presente dos custos de corte do talhão  $i$  no período  $j$ , em US\$/ha;

$T_i$  = valor presente dos custos de não selecionar para corte o talhão  $i$ , em US\$/ha;

$Q_i$  = área do talhão  $i$  não selecionada para corte, em ha;

$B_j$  = valor presente dos custos de não baldear madeira em áreas cortadas no período  $j$ , em US\$/ha;

$U_{jm}$  = área não selecionada para extração de madeira em áreas cortadas no período  $j$  pela equipe  $m$ , em ha;

$DI_k^-$  e  $DI_k^+$  = quantidades sub e superestimadas em relação a demanda do período  $k$ ;

$wI_k^-$  e  $wI_k^+$  = penalidade por unidade sub e superestimada em relação a demanda do período  $k$ .

Para representar a integridade de áreas e o sequenciamento das variáveis de decisão durante todo o horizonte de planejamento, foram estruturadas as seguintes restrições:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M X_{ijm} + Q_i = A_i \quad i=1, \dots, T \quad (2)$$

$$\sum_{k=j}^J \sum_{m=1}^M Y_{jkm} + \sum_{k=j}^J U_{jm} - \sum_{k=j}^J \sum_{k=j}^J X_{ijm} = 0 \quad j=1, \dots, J \quad (3)$$

Onde:

$A_i$  = área do talhão  $i$ , em ha.

Uma restrição complementar às eq. (2) e (3) foi acrescentada para representar a operação de colheita completa do talhão  $i$  pela equipe de co-

lheita própria  $m$ , caso seja selecionado, ao longo dos períodos de planejamento.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M X_{ijm} - A_i \sum_{m=1}^M \alpha_{im} = 0 \quad i=1, \dots, T \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J Y_{jkm} - \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J X_{ijm} = 0 \quad m=1, \dots, M \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M \alpha_{im} \leq 1 \quad i=1, \dots, T \quad (6)$$

Onde:

$\alpha_{im}$  = adquire valor 1 se for selecionada para o talhão  $i$  a equipe  $m$  de corte e extração, caso contrário adquire valor 0.

As restrições construídas para balizar o rendimento das equipes próprias de corte e extração são:

$$LmáxCol_{jm} - \sum_{i=1}^T \sum_{m=1}^M Ec_{ijm} X_{ijm} \geq 0 \quad j=1, \dots, J \text{ e } m=1, \dots, M \quad (7)$$

$$LmáxBal_{km} - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M Eb_{jkm} Y_{ikjm} \geq 0 \quad j=1, \dots, J \text{ e } m=1, \dots, M \quad (8)$$

Onde:

$LmáxCol_{jm}$  = Limite máximo de corte para a equipe própria  $m$  durante o período  $j$ , em horas a serem trabalhadas;

$LmáxBal_{km}$  = Limite máximo de extração para a equipe própria  $m$  durante o período  $k$ , em horas a serem trabalhadas;

$Ec_{ijm}$  = rendimento de corte para a equipe  $m$  no talhão  $i$  durante o período  $j$ , em horas trabalhadas/ha;

$Eb_{jkm}$  = rendimento de extração durante o período  $k$  para a equipe  $m$  em áreas cortadas no período  $j$ , em horas trabalhadas/ha.

Para equalizar o atendimento da demanda de madeira a ser fornecida, foi elaborada a seguinte restrição:

$$Demanda_k - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M V_{jk} Y_{jkm} + DI_k^- - DI_k^+ = 0 \quad k=1, \dots, J \quad (9)$$

Onde:

$Demanda_k$  = demanda de madeira estabelecida para o período  $k$ , em m<sup>3</sup>/mês;

$V_{jk}$  = volume disponível para extração no período  $k$  em áreas cortadas no período  $j$  pela equipe  $m$ , em m<sup>3</sup>/ha.

Além da estruturação do modelo padrão, foram elaborados diferentes cenários incorporando-se três importantes restrições e suas combinações.

**Cenário 2 - Expansão da capacidade operacional:** considera o aumento de capacidade nas operações de colheita ou de contratação de equipes terceirizadas para o atendimento da demanda mensal de corte e extração. A representação dessa restrição no modelo matemático é apresentada a seguir:

$$Demanda_k - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M V_{jk} Y_{jkm} - \sum_{i=1}^T V_{ik} Z_{ik} = 0 \quad k=1, \dots, J \quad (10)$$

Onde:

$Z_{ik}$  = área colhida por equipes terceirizadas no talhão i e período k, em ha;

$V_{ik}$  = volume disponível para colheita no talhão i no período k, em m<sup>3</sup>/ha.

A incorporação da possibilidade de terceirização tornou necessárias as seguintes atualizações nas eq. (2) e (9), respectivamente:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M X_{ijm} + Q_i + \sum_{k=j}^J Z_{ik} = A_i \quad (11)$$

$$Demanda_k - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M V_{jk} Y_{jkm} - \sum_{i=1}^T V_{ik} Z_{ik} + DI_k^- - DI_k^+ = 0 \quad k=1, \dots, J \quad (12)$$

Além dessa atualização, a eq. (1) foi alterada para:

$$\begin{aligned} Max Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J \sum_{m=1}^M (Rb_{jk} - Cb_{jk}) Y_{jkm} - \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M Cc_{ij} X_{ijm} - \sum_{i=1}^T T_i Q_i - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M B_j U_{jm} + \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{k=j}^J (Rt_{ik} - Ct_{ik}) Z_{ik} - \\ & \sum_{k=j}^J (wI_k^- DI_k^- + wI_k^+ DI_k^+) \quad (13) \end{aligned}$$

Onde:

$Rt_{ik}$  = valor presente da receita bruta devido à colheita de madeira por equipes terceirizadas no talhão i no período k, em US\$/ha;

$Ct_{ik}$  = valor presente dos custos da colheita de madeira no talhão i no período k, em US\$/ha.

**Cenário 3 - Restrição de abastecimento:** considera a densidade básica da madeira a ser colhida, que não pode apresentar altas taxas de variação ao longo dos meses para o processo de fabricação de celulose. Neste estudo, considerou-se como referência a variação máxima e mínima de

5% para a densidade média ponderada pelo volume colhido, obtida com o processamento do modelo padrão. A representação dessa restrição no modelo matemático é apresentada a seguir:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M P_{jk} Y_{jkm} - L_{mín} Db_k \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M V_{jk} Y_{jkm} + D2_k^- = 0 \quad k=1, \dots, J \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M P_{jk} Y_{jkm} - L_{máx} Db_k \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M V_{jk} Y_{jkm} + D2_k^+ = 0 \quad k=1, \dots, J \quad (15)$$

Onde:

$P_{jk}$  = peso médio atribuído as áreas a serem balanceadas no período k em áreas cortadas no período j, em Mg/ha;

$L_{mín} Db_k$  = limite mínimo para densidade básica média no período k, em Mg/m<sup>3</sup>;

$L_{máx} Db_k$  = limite máximo para densidade básica média no período k, em Mg/m<sup>3</sup>;

$D2_k^-$  e  $D2_k^+$  = quantidades sub e superestimadas da densidade média a ser fornecida no período k.

Ao incorporar essas restrições no modelo matemático, a eq. (1) foi alterada para a equação abaixo:

$$\begin{aligned} Max Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J \sum_{m=1}^M (Rb_{jk} - Cb_{jk}) Y_{jkm} - \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M Cc_{ij} X_{ijm} - \sum_{i=1}^T T_i Q_i - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M B_j U_{jm} - \\ & \sum_{k=j}^J (wI_k^- DI_k^- + wI_k^+ DI_k^+) - \\ & \sum_{j=1}^J (w2_k^- D2_k^- + w2_k^+ D2_k^+) \quad (16) \end{aligned}$$

Onde:

$w2_k^-$  e  $w2_k^+$  = penalidade por unidade de sub e superestimação da densidade média da madeira a ser fornecida no período k.

**Cenário 4 - Restrição ambiental:** considera a da área submetida a corte e extração em época de risco ambiental, isto é, alto potencial de alagamento, pois certos talhões definidos em determinadas classes de relevo não devem ser colhidos em época de excedente hídrico. A representação desta restrição é apresentada a seguir:

$$\sum_{i=1}^T \sum_{m=1}^M X_{ijm} + \sum_{k=j}^J \sum_{m=1}^M Y_{jkm} - D3_j^+ = 0 \quad (17)$$

Onde:

$X_{ijm}$  = área a ser cortada pela equipe m no ta-

lhão  $i'$  pertencente a determinada classe de relevo no período  $j'$  em época de excedente hídrico, em ha, sendo:  $i=1, \dots, T$ ;  $j=1, \dots, J$ ;  $i' \in i$ ;  $j' \in j$ ;  
 $Y_{jkm}$  = área a ser baldeada no período  $k'$  de excedente hídrico e cortada no período  $j$  pela equipe  $m$ , em ha, sendo  $k=1, \dots, J$ ;  $k' \in k$ ;  
 $D3_{j'}^+$  = quantidade superestimada em relação à área a ser colhida em época de risco ambiental no período  $j'$ .

Com a incorporação desta restrição, a eq. (1) foi alterada para a equação abaixo:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J \sum_{m=1}^M (Rb_{jk} - Cb_{jk}) Y_{jkm} - \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M Cc_{ij} X_{ijm} - \sum_{i=1}^T T_i Q_i - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M B_j U_{jm} - \\ & \sum_{k=j}^J (wI_k^- DI_k^- + wI_k^+ DI_k^+) - \sum_{j'=j}^J (w3_{j'}^+ . D3_{j'}^+) \quad (18) \end{aligned}$$

Onde:

$w3_{j'}^+$  = penalidade por unidade de superestimação da área a ser colhida em época de risco ambiental no período  $j'$ .

Algumas combinações das três restrições citadas são desejáveis. Para o processamento de modelos utilizando essas combinações, foram necessárias ainda as seguintes alterações na formulação padrão.

**Cenário 5 - Combinação de restrições ambiental e de abastecimento:** foram incorporadas as eq. (14), (15) e (17) ao modelo padrão e alterada a eq. (1) para:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J \sum_{m=1}^M (Rb_{jk} - Cb_{jk}) Y_{jkm} - \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M Cc_{ij} X_{ijm} - \sum_{i=1}^T T_i Q_i - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M B_j U_{jm} - \\ & \sum_{k=j}^J (wI_k^- DI_k^- + wI_k^+ DI_k^+) - \\ & \sum_{k=j}^J (w2_k^- D2_k^- + w2_k^+ D2_k^+) - \sum_{j'=j}^J (w3_{j'}^+ . D3_{j'}^+) \quad (19) \end{aligned}$$

**Cenário 6 - Combinação da ampliação da capacidade operacional e restrição de abastecimento:** foram incorporadas ao modelo padrão as eq. (10), (14) e (15), substituída a equação (2) pela equação (11) e a equação (9) pela equação (12), e alterada a eq. (1) para:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J \sum_{m=1}^M (Rb_{jk} - Cb_{jk}) Y_{jkm} - \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M Cc_{ij} X_{ijm} - \sum_{i=1}^T T_i Q_i - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M B_j U_{jm} - \\ & + \sum_{i=1}^T \sum_{k=j}^J (Rt_{ik} - Ct_{ik}) Z_{ik} - \\ & \sum_{k=j}^J (wI_k^- DI_k^- + wI_k^+ DI_k^+) - \\ & \sum_{k=j}^J (w2_k^- D2_k^- + w2_k^+ D2_k^+) \quad (20) \end{aligned}$$

**Cenário 7 - Combinação da expansão da capacidade operacional com a restrição ambiental:** foram incorporadas ao modelo padrão as equações (10) e (17), substituída a equação (2) pela equação (11) e a equação (9) pela equação (12), e alterada a eq. (1) para:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J \sum_{m=1}^M (Rb_{jk} - Cb_{jk}) Y_{jkm} - \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M Cc_{ij} X_{ijm} - \sum_{i=1}^T T_i Q_i - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M B_j U_{jm} + \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{k=j}^J (Rt_{ik} - Ct_{ik}) Z_{ik} - \\ & \sum_{k=j}^J (wI_k^- DI_k^- + wI_k^+ DI_k^+) - \sum_{j'=j}^J (w3_{j'}^+ . D3_{j'}^+) \quad (21) \end{aligned}$$

**Cenário 8 - Combinação da expansão da capacidade operacional com as restrições de abastecimento e ambiental:** foram incorporadas ao modelo padrão as equações (10), (14), (15) e (17), substituída a equação (2) pela equação (11) e equação (9) pela equação (12), e alterada a eq. (1) para:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J \sum_{m=1}^M (Rb_{jk} - Cb_{jk}) Y_{jkm} - \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M Cc_{ij} X_{ijm} + \sum_{i=1}^T \sum_{k=j}^J (Rt_{ik} - Ct_{ik}) Z_{ik} - \\ & \sum_{i=1}^T T_i Q_i - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M B_j U_{jm} - \\ & \sum_{k=j}^J (wI_k^- DI_k^- + wI_k^+ DI_k^+) - \\ & \sum_{k=j}^J (w2_k^- D2_k^- + w2_k^+ D2_k^+) - \\ & \sum_{j'=j}^J (w3_{j'}^+ . D3_{j'}^+) \quad (22) \end{aligned}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Comportamento das variáveis demanda e volume

Para os cenários avaliados, foi possível mensurar a diferença entre o volume obtido e a demanda de madeira entregue ao longo dos meses. Observa-se que para o cenário onde houve somente a expansão da capacidade operacional (cenário 2) ocorreram as menores diferenças entre volume agendado e demanda. As maiores variações foram encontradas nos cenários em que são incorporadas as restrições, tanto de abastecimento quanto a restrição ambiental (cenários 3, 4 e 5). Para os cenários que consideram a expansão da capacidade operacional, essa diferença tende a se equilibrar, apesar de ocorrer déficit acentuado de demanda nos cenários 7 e 8.

Para efeito de comparações foi calculado, para todos os cenários e para o agendamento efetivamente implementado pela empresa, o desvio total em relação à demanda pré-definida. O resultado dessa comparação é apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Comparação entre os valores médios de volume a ser colhido e os resultados reais, para os períodos avaliados.

**Table 1.** Comparison between the mean volume values to be harvested and the real results, within the periods evaluated.

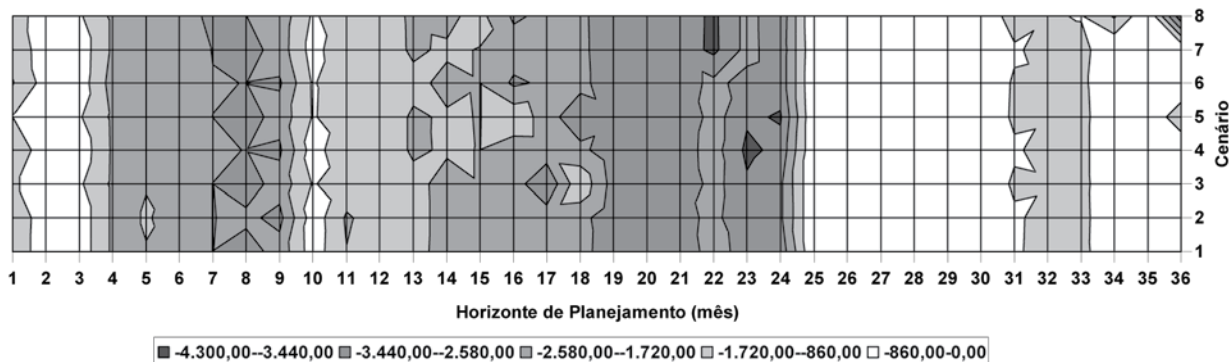
Cenário	Desvio entre volume colhido e demanda (m³)	Varição em relação ao realizado pelo agendamento da empresa (%)
1	-167.845,60	-76,62
2	-3.533,70	-99,51
3	-213.743,80	-70,23
4	-201.713,60	-71,90
5	-251.081,80	-65,03
6	-25.311,20	-96,47
7	-63.390,30	-91,17
8	-112.930,90	-84,27

Para todos os cenários avaliados pode-se observar uma drástica redução da diferença entre o volume colhido e a demanda, quando comparado ao resultado obtido pelo agendamento da empresa. Os cenários que consideraram a expansão da capacidade operacional apresentaram as menores diferenças e as maiores variações em relação ao resultado obtido pelo agendamento da empresa, principalmente, pelo fato de que o volume disponível para colheita dentro do horizonte de planejamento foi aproveitado em sua totalidade. As maiores diferenças e as menores variações em relação ao resultado obtido pelo agendamento da empresa foram observadas para os cenários onde houve a inclusão simples da restrição ambiental e a inclusão combinada de restrições ambientais e de abastecimento, respectivamente.

### Rendimentos operacionais

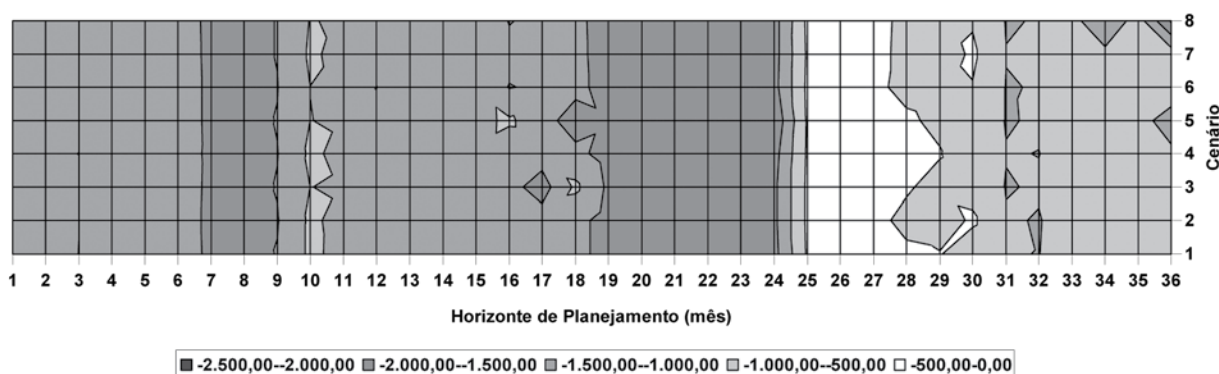
Com relação aos rendimentos esperados para as equipes próprias de colheita, observaram-se (Figura 1) nos dois primeiros anos, períodos entre 1 a 24, um déficit entre as horas a serem efetivamente trabalhadas e o limite máximo mensal, o que pode ser interpretado como subutilização das máquinas de corte. Essa subutilização foi evidenciada para os períodos citados, principalmente, nos cenários que incorporaram a restrição ambiental. Para o terceiro ano, períodos entre 25 e 36, entretanto, observou-se baixo déficit, sendo caracterizado como o período que favoreceria a contratação de equipes terceirizadas. Nesses períodos, para os cenários que avaliam a expansão da capacidade operacional, intensificou-se o volume colhido por equipes terceirizadas.

Ao se analisar a atividade de extração, dentre os cenários avaliados, observa-se (Figura 2) que a mesma apresenta grau de subutilização de máquinas maior comparada à atividade de colheita, devido à configuração dos módulos de colheita.



**Figura 1.** Distribuição das diferenças entre as horas a serem efetivamente trabalhadas e o limite máximo mensal, na atividade de corte, para os cenários avaliados.

**Figure 1.** Differences distribution between the hours to be effectively worked and maximum monthly limits, in the felling activity, for the scenarios evaluated.



**Figura 2.** Distribuição dos desvios entre as horas a serem efetivamente trabalhadas e o limite máximo mensal, na atividade de extração, para os cenários avaliados.

**Figure 2.** Distribution of the deviations between the hours to be effectively worked and maximum monthly limits, in the hauling activity, for scenarios evaluated.

Comparando-se os desvios entre as horas previstas de trabalho e o limite mensal obtidos nos cenários com os desvios entre as horas efetivamente trabalhadas e o limite mensal do resultado obtido pelo agendamento da empresa (Tabela 2), para a atividade de corte, é possível observar uma melhor alocação de máquinas em todos os cenários avaliados.

O cenário que obteve a melhor solução para essa variável foi o cenário padrão (cenário 1) por somente apresentar uma alternativa de colheita. Além desse cenário, a incorporação de restrição de abastecimento também gerou bons resultados em relação às horas efetivamente trabalhadas e demais cenários, sendo somente maior que os resultados obtidos no cenário 1. Em seguida, o cenário onde foi avaliada a expansão da capacidade operacional (cenário 2) verifica-se redução nos desvios menor que os dois cenários citados anteriormente, pois ao se avaliar a viabilidade de se alocar uma equipe de colheita própria para um determinado talhão, quando essa alternativa torna-se inviável, a alternativa recomendada passa a ser a alocação de uma equipe terceirizada, mesmo havendo subutilização de máquinas próprias.

Ao se incorporar a restrição de abastecimento, por se avaliar de forma mais rigorosa a variabilidade da densidade da madeira, a obtenção de um fluxo de abastecimento com menos variabilidade na densidade passa a ser priorizado em detrimento da alocação de máquinas. Os níveis mais altos desses desvios foram observados para todos os cenários em que a restrição ambiental foi avaliada. Isso se explica pela restrição imposta à entrada em determinados talhões em certas épocas, gerando subutilização de máquinas nos talhões colhidos no trimestre de direcionamento de colheita.

A distribuição dos rendimentos para a atividade de extração obteve a mesma tendência observada para a atividade de corte (Tabela 2), tanto para os cenários avaliados quanto para os resultados do agendamento usado pela empresa. Porém, na comparação dos desvios entre horas trabalhadas e limite mensal com os desvios entre horas efetivamente trabalhadas e limite mensal, foi observado que nos cenários onde foi incorporada a restrição ambiental ou agregação de mais de um item ao modelo padrão, ocorre impacto negativo em relação aos resultados do agendamento da empresa. Essa característica se deve ao maior rigor imposto nos cenários avaliados.

**Tabela 2.** Comparação dos desvios entre as horas a serem trabalhadas e o limite mensal e os desvios entre as horas efetivas trabalhadas e o limite mensal, nas atividades de corte e extração, para os períodos avaliados.

**Table 2.** Comparison of the target deviations between the hours to be worked and monthly limit and the differences between hours effectively worked and the monthly limit, in the harvest activities, for the periods evaluated.

Cenário	Desvio de horas trabalhadas em relação ao limite máximo mensal		Variação em relação ao realizado pelo agendamento da empresa (%)	
	Corte	Extração	Corte	Extração
1	-51.256,00	-39.884,30	-28,15	-0,96
2	-51.497,50	-39.976,70	-27,82	-0,73
3	-51.311,30	-39.974,60	-28,08	-0,73
4	-52.051,60	-40.506,50	-27,04	0,59
5	-53.707,20	-40.928,70	-24,72	1,64
6	-53.525,50	-40.729,20	-24,97	1,14
7	-52.500,30	-40.644,10	-26,41	0,93
8	-59.544,70	-42.740,30	-16,54	6,14



### Densidade média

Para a variável densidade média pode-se observar uma distribuição relativamente equilibrada para os cenários 3, 5 e 6, os quais contabilizaram a restrição de abastecimento. Para os demais cenários pode-se observar (Figura 3) nos períodos 16, 34 e 36 uma alta taxa de variação em relação aos demais períodos.

Comparando-se os desvios em relação à densidade média para os resultados do agendamento efetivamente usado pela empresa com os resultados obtidos para os cenários avaliados (Tabela 3) nota-se a alta taxa de redução da variabilidade em todos os cenários, principalmente para os cenários 3, 5 e 6, o que se caracteriza como sendo uma melhor organização dos talhões colhidos e maior homogeneidade da madeira entregue.

### Colheita em áreas sob época de risco ambiental

Pode-se observar, para a recomendação de colheita em função da época de risco ambiental (Figura 4), que os períodos de ocorrência dessa situação concentraram-se principalmente nos períodos 13, 34 e 35, equivalente aos meses de julho/2006, abril/2007 e maio/2007, respectivamente.

Comparando-se o comportamento dos cenários que consideraram essa restrição com os demais, principalmente para os cenários 4, 7 e 8, observa-se o impacto da restrição da colheita em áreas de risco sobre o fornecimento de madeira e sobre a regularidade da densidade de madeira a ser entregue. Para o cenário 5, entretanto, observa-se um pequeno favorecimento dessa restrição ao atendimento da restrição de abastecimento. Comparando-se os desvios entre as distribuições das áreas a serem colhidas em época de risco ambiental, para os cenários avaliados, e a distribuição das áreas efetivamente trabalhadas nessas mesmas épocas, nota-se re-

dução desses desvios em todos os cenários avaliados, principalmente para os cenários 4, 7 e 8. Essa comparação é apresentada na Tabela 4. Este comportamento evidencia a tendência de equilibrar o sequenciamento de colheita para atender às especificações pré-definidas, assim como já observado nas demais restrições.

**Tabela 3.** Comparação dos desvios entre densidade média e limites máximos e mínimos para os cenários avaliados e resultados realizados, respectivamente.

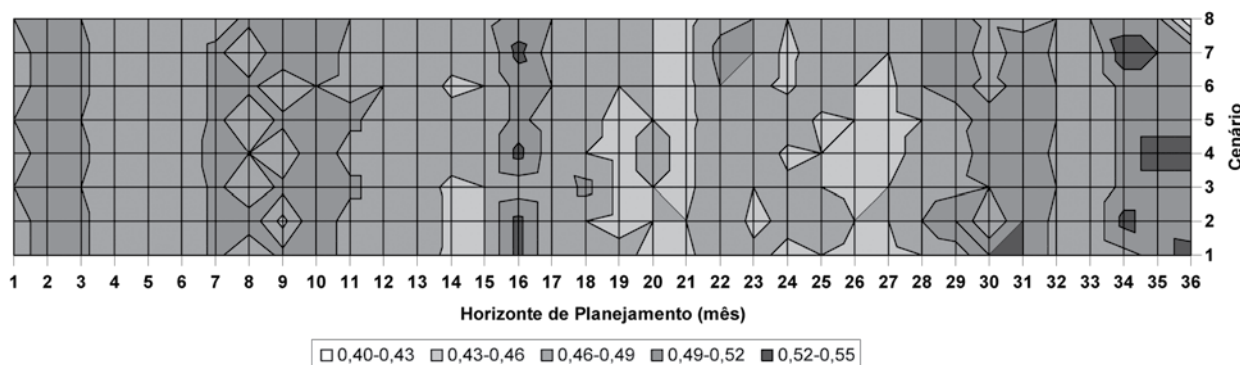
**Table 3.** Comparison of target deviations between the mean density and the maximum and minimum limits for the evaluated scenarios and real results, respectively.

Cenário	Desvios de densidade em relação à Densidade Média (Mg/m <sup>3</sup> )	Varição em relação ao realizado pelo agendamento da empresa (%)
1	-0,16	-85,68
2	-0,13	-88,23
3	0,00	-100,00
4	-0,17	-84,60
5	0,00	-100,00
6	0,00	-100,00
7	-0,18	-83,70
8	-0,45	-59,24

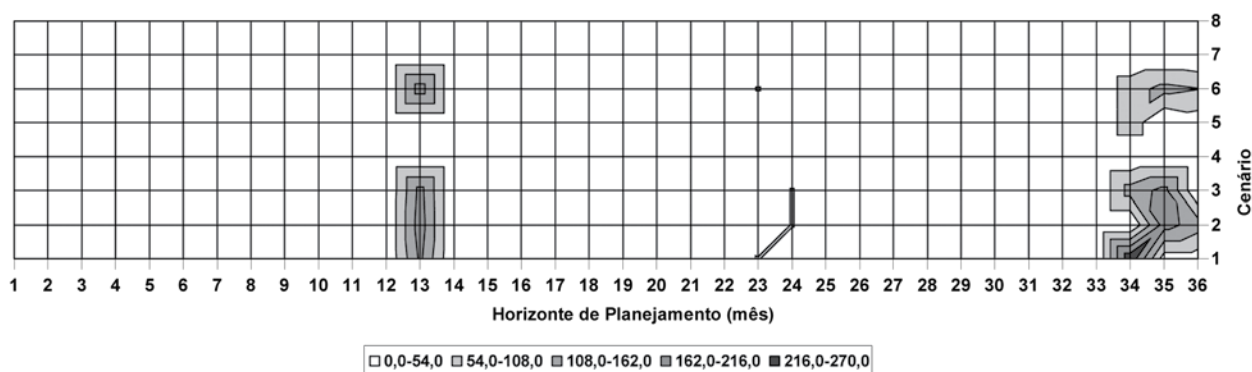
**Tabela 4.** Comparação dos desvios entre a área efetivamente trabalhada em época de risco ambiental em relação à meta, para os cenários avaliados e resultados realizados, respectivamente.

**Table 4.** Comparison of target deviations between the actual worked area in environmental risk periods related to the target, for the evaluated scenarios, and real results, respectively.

Cenário	Desvios Área (ha)	Varição em relação ao realizado pelo agendamento da empresa (%)
1	-559,2	-5,51
2	-590,7	-0,19
3	-567,2	-4,16
4	0,0	-100,00
5	-109,6	-81,48
6	-590,7	-0,19
7	0,0	-100,00
8	0,0	-100,00



**Figura 3.** Distribuição da densidade média, em Mg/m<sup>3</sup>, para os cenários avaliados.  
**Figure 3.** Mean density distribution, in Mg/m<sup>3</sup>, for scenarios evaluated.



**Figura 4.** Distribuição da área a ser trabalhada, em ha, em época de risco ambiental para os cenários avaliados.  
**Figure 4.** Distribution of the area to be worked, in ha, in environmental risk periods for scenarios evaluated.

## CONCLUSÃO

Através desse estudo, elaborou-se um modelo de programação linear por metas para a representação do problema de planejamento operacional da colheita, permitindo a avaliação do mesmo em distintos cenários, além da comparação com os resultados efetivamente obtidos pela empresa onde se desenvolveu o estudo de caso.

Foi constatado que as técnicas de programação linear oferecem a possibilidade da integração de relevantes aspectos operacionais e ambientais, que geralmente são considerados de forma incompleta nos métodos convencionais de planejamento. Complementarmente, ao se considerar como referência os resultados efetivamente alcançados pela empresa no período de análise e os demais indicadores utilizados, todos os cenários avaliados mostraram-se eficientes, por resultarem em melhor desempenho, e eficazes, por considerarem integralmente os aspectos e limitações operacionais e ambientais da colheita. Assim demonstrando os ganhos das técnicas de otimização para a elaboração e análise de planos de manejo também em nível operacional.

Dentre os cenários abordados neste estudo, recomenda-se principalmente a estratégia gerada para o cenário 8, pois esse cenário contempla o maior número de restrições e objetivos pré-estabelecidos. Além disso, esse cenário apresenta bom desempenho em relação aos indicadores analisados e desempenho superior à estratégia adotada pela empresa. Ressalta-se que, sendo possível evitar a colheita em talhões sob restrição ambiental, ao se considerar um pré-definido direcionamento da frente de colheita, os cenários 6 e 8 apresentam resultados equivalentes. Essa configuração é certamente bastante recomendável, devido à boa qualidade dos resultados apresentados pelo cenário 6 e, nesse contexto, a estratégia proposta para esse cenário se apresenta igualmente recomendável.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa florestal Bontnia/Forestal Oriental, à empresa Remsoft, à empresa Mosek e à empresa Savcor Forest.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALTEIRO, D.L.; ROMERO, C. Modeling timber harvest scheduling problems with multiple criteria: an application in Spain. *Forest Science*, Bethesda, v.44, n.1, p.47-56, 1998.
- BASKENT, E.Z.; KELES, S. Spatial forest planning: a review. *Ecological Modelling*, Kidlington, v.188, p.145-173, 2005.
- BATEMAN, T.S.; SNELL, S.A. **Administração: construindo vantagem competitiva.** São Paulo: Atlas, 1998. 539p.
- BUONGIORNO, J.; GILLESS, J.K. **Decision methods for forest resource management.** San Diego: Academic Press, 2003. 439p.
- JOHNSON, K.N.; SCHEURMAN, H.L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives: discussion and synthesis. *Forest Science Monograph*, Washington, v.18, p.1-31, 1977.
- MACHADO, C.C.; LOPES, E.S. Planejamento. In: MACHADO, C.C. **Colheita florestal.** 2.ed. Viçosa: UFV, 2008. p.185-230.
- MACHADO, C.C.; SILVA, E.N.; PEREIRA, R.S. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C.C. **Colheita florestal.** 2.ed. Viçosa: UFV, 2008. p.15-42.

- MITCHEL, S.A. **Operational forest harvest scheduling optimization: a mathematical model and solution strategy**. 2004. 278p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de Produção, Universidade de Auckland, Auckland, 2004.
- MOSEK. **Mosek optimization tools: version 5.0**. Copenhagen, 2008. Disponível em: <[www.mosek.com](http://www.mosek.com)>. Acesso em: 4 set. 2008.
- REMSOFT. **Remsoft Spatial Planning System – RSPS: version 2008.12**. Fredericton, 2008. Disponível em: <<http://www.remsoft.com>>. Acesso em: 4 set. 2008.
- RODRIGUEZ, L.C.E. **Planejamento agropecuário através de um modelo de programação linear não determinista**. 1987. 83p. Tese (Mestrado em Economia Agrária) - Escola Superior Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.
- RODRIGUEZ, L.C.E.; BORGES, J.G.C. Técnicas matemáticas para determinação de níveis sustentáveis de produção em eucaliptais. **Revista Florestal**, Lisboa, v.12, n.1/2, p.83-92, 1999.
- SEIXAS, F.; MAGRO, T.C. Indicadores ambientais e paisagísticos relacionados às operações florestais. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v.12, n.31, p.65-78, 1998.
- SESSIONS, J.; BETTINGER, P. Hierarchical planning: pathway to the future? In: INTERNATIONAL PRECISIONFORESTRYCOOPERATIVESYMPOSIUM, 1, 2001, Seattle. **Proceedings...** Seattle: USDA Forest Service, 2001. p.185-190.
- VIERA, G.A. Logística de processo florestal: uma abordagem gerencial. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 13, 2004, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2004. p.147-92.

Recebido em 01/04/2009

Aceito para publicação em 08/02/2010

