



**PLANEJAMENTO DA COLHEITA
FLORESTAL: O USO DA PROGRAMAÇÃO
INTEIRA**

ALESSANDRO CRUVINEL FIDELIS

1999

ALESSANDRO CRUVINEL FIDELIS

P
A. CRUVINEL FIDELIS
1999

**PLANEJAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL:
O USO DA PROGRAMAÇÃO INTEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Administração Rural, Área de Concentração Administração Rural e Desenvolvimento, para obtenção do título de "Mestre"

Orientador

Prof. Ricardo Pereira Reis

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

1999

**CENTRO de DOCUMENTAÇÃO
CEDOC/DAE/UFLA**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Fidelis, Alessandro Cruvinel

Planejamento da colheita florestal : o uso da programação inteira / Alessandro
Cruvinel Fidelis. -- Lavras : UFLA, 1999.

42 p. : il.

Orientador: Ricardo Pereira Reis..

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Colheita florestal. 2. Floresta – Colheita. 3. Otimização. 4. Programação
linear. 5. Programação inteira. 6. Planejamento. 7. Programa de computador. 8.
Custo. 9. Modelo matemático. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-634.98

ALESSANDRO CRUVINEL FIDELIS

**PLANEJAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL:
O USO DA PROGRAMAÇÃO INTEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Mestrado em Administração Rural, área de Concentração Administração Rural e Desenvolvimento, para obtenção do título de “Mestre”.

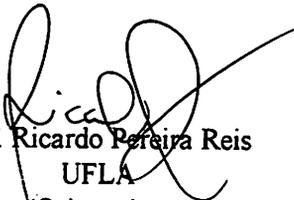
APROVADA em 7 de julho de 1999

Prof. Antônio João do Reis

UFLA

Prof. Luiz Gonzaga de Castro Júnior

UFLA



Prof. Ricardo Pereira Reis
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

1999

A meus pais,

**José Fidelis dos Santos Filho e
Luzia Cruvinel Pereira**

Ofereço.

**À mulher da minha vida, Adriane e
a minha querida filha, Amanda
Dedico.**

AGRADECIMENTOS

À UFLA - Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade de realização deste curso.

À CAPES, pelo apoio através da concessão de bolsa de estudos.

À empresa MANNESMANN FLORESTAL, ao Eng. Agrônomo Antônio Claret de Oliveira, aos Eng. Florestais Fábio Túlio Lima Cró e Jonas Machado Pires, pela receptividade e pela concessão de dados essenciais para a realização deste trabalho.

Ao professor Ricardo Pereira Reis, pela orientação e pelo incentivo às novas idéias.

Ao professor Antônio João dos Reis, pela valiosa colaboração.

Ao professor Luiz Gonzaga de Castro Júnior, pela disposição e colaboração.

A todos os funcionários do Departamento de Administração e Economia, pela dedicação e solidariedade.

Aos amigos , Douglas, Escobar e Murilo, pelo companheirismo e incentivo.

À grande amiga Vera Lúcia pelo incentivo, apoio e presença amiga.

SUMÁRIO

| | Página |
|---|--------|
| RESUMO..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 01 |
| 1.1 O problema e sua importância..... | 01 |
| 1.2 Objetivos..... | 02 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA..... | 03 |
| 3 METODOLOGIA..... | 06 |
| 3.1 Área de estudo e fonte de dados..... | 06 |
| 3.2 Modelo teórico..... | 07 |
| 3.3 Modelo de análise..... | 10 |
| 3.3.1 <i>Mixed integer programming</i> (MIP)..... | 12 |
| 3.3.2 Operacionalização do modelo..... | 13 |
| 3.3.3 Modelo matemático APCF 1..... | 18 |
| 3.3.4 Interação entre as variáveis do modelo APCF 1..... | 20 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 22 |
| 4.1 Custo hora do trator <i>Feller-buncher</i> | 22 |
| 4.2 Relação entre a produtividade e o custo de corte..... | 23 |
| 4.3 Planejamento da colheita florestal através do modelo de apoio ao planejamento da colheita florestal (APCF 1) | 27 |
| 5. CONCLUSÕES | 34 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 36 |
| ANEXOS..... | 38 |

RESUMO

FIDELIS, Alessandro Cruvinel. **Planejamento da colheita florestal: o uso da programação inteira**. Lavras: UFLA, 1999. 40p. (Dissertação - Mestrado em Administração Rural)*.

No Brasil, a colheita florestal vem sendo planejada de acordo com técnicas obsoletas e intuitivas, embora seja a atividade que mais onera o custo de produção da madeira. O presente estudo foi realizado em áreas florestadas de *Eucalyptus urophylla* na região Norte de Minas, município de Bocaiúva com o objetivo de propor um modelo matemático para apoiar a tomada de decisão no planejamento bianual da colheita florestal. Foram disponibilizadas 204 (duzentas e quatro) glebas para corte com produtividade média de 205 estéreos/ha. O modelo proposto busca a otimização da colheita florestal, minimizando-se o custo de corte do trator florestal *feller-buncher* e atendendo à demanda por madeira da empresa. Foi utilizada a técnica de Programação Inteira denominada *Mixed Integer Programming*, para a construção deste modelo. O custo hora do trator florestal *feller-buncher* foi de US\$ 17,27 por hora total e US\$ 25,58 por hora efetiva de trabalho. A capacidade de campo do trator florestal tende a diminuir com o aumento da produtividade da gleba, aumentando, portanto, o custo de corte por hectare, enquanto diminui o custo de corte por estéreo de madeira. Das 204 (duzentas e quatro) glebas disponibilizadas, o modelo de apoio ao planejamento da colheita florestal-APCF 1 selecionou 46 para serem colhidas no primeiro ano e 42 no segundo, com um custo de corte de US\$ 91.942,00 e US\$ 79.379,00 respectivamente, atendendo a demanda de madeira da empresa. Os resultados obtidos permitiram verificar que a faixa ótima de produtividade das glebas disponibilizadas para corte encontra-se acima de 150 st/ha e a decisão de não colher glebas abaixo destes níveis pode representar uma economia de até US\$70.000,00 ao ano. Ressalta-se que o modelo usado neste estudo pode ser empregado para apoiar o planejamento florestal em diferentes períodos, proporcionando a agilidade necessária à reprogramação de planos mediante flutuações futuras na disponibilidade de recursos.

*Comitê Orientador: Ricardo Pereira Reis - UFLA (Orientador); Antônio João dos Reis - UFLA.

ABSTRACT

FIDELIS, Alessandro Cruvinel. Forest harvest planning: use of integer programming model. Lavras: UFLA, 1999. 42p. (Dissertation – Master in Rural Administration)*.

Forest harvest is the activity with the largest share in timber cost. Meanwhile, obsolete techniques have been applied in Brazil for the development of the forest harvest plan. This here study was carried out in a *Eucalyptus urophylla* forest, located in Bocaiúva town, north of Minas Gerais state, Brazil. The first goal of this study was to develop a mathematical model to support harvest plan's decision-making for two years. The proposed model seeks the best alternative for reducing fell cost of feller-buncher forest tractor, attending the company's demand on wood. Integer Programming technique known as Mixed Integer Programming was used. The cost of feller-buncher was US\$17.27 for total clock hour and US\$ 25.58 for each effectively worked hour. Increasing forest productivity tends to reduce feller-buncher's area productivity.. On the other hand, wood cost tends to reduce in function the increase in the volume of hourly-felled wood. Forty six areas were selected by the APCF 1 model to be harvested during the first year and forty two in the second year, from a total of 204 available areas, with feller cost amounting to US\$ 91,942.00 and US\$ 79,379.00 respectively. This work demonstrated that the best productivity level to be felled is one above 150 st/ha and that decision-making can reduce cost by about US\$ 70,000.00 per year. The developed model can be used to support forest planning in any time lapse, allowing for quick planning adjustments as for external changes.

1 INTRODUÇÃO

1.1 O problema e sua importância

Após a crise mundial de energia ocorrida na década de 1970, em decorrência do alto custo dos derivados de petróleo, intensificou-se a necessidade de fontes alternativas geradoras de energia, dentre elas a madeira, principalmente, por se tratar de uma fonte renovável.

Com o objetivo de estimular o reflorestamento no Brasil, o governo adotou uma política de concessão de incentivos fiscais para o setor florestal, promulgando a lei nº 5106 de 2 de setembro de 1966, levando-o a ganhar um novo rumo (Chichorro et al., 1994). Em 1985, a área total reflorestada no Brasil já era de 2,3 milhões de hectares, passando para 3,6 milhões em 1994 (Anuário Estatístico, 1995).

Em decorrência do aumento do consumo de carvão vegetal e a escassez de matas nativas, o reflorestamento tornou-se essencial para a manutenção da atividade siderúrgica. Com o fim dos incentivos fiscais, a atividade florestal precisou tornar-se mais eficiente, demandando uma gestão criteriosa dos recursos envolvidos no processo produtivo.

Na produção de madeira, a colheita é uma fase bastante onerosa e, juntamente com o transporte florestal, representam cerca de 50% ou mais do custo total da madeira (Machado, 1994).

O planejamento da colheita florestal é essencial para a coordenação das atividades, permitindo otimizar o uso de máquinas e equipamentos, regular o fluxo de madeira, elevar a produtividade e reduzir os custos. Ele deve levar em consideração um grande número de fatores, como: tamanho e uniformidade das

glebas; idade das plantas; incremento de volume de um ano para o outro; volume, produtividade e custos estimados; distância entre a área de plantio e a área de descarga das toras, entre outros, para que se consiga atender à demanda de madeira do período em questão, otimizando-se ao máximo os fatores de produção.

No Brasil, para florestas de rápido crescimento, o planejamento das glebas que serão colhidas é realizado através de técnicas obsoletas e intuitivas, demandando uma grande quantidade de tempo e, normalmente, chegando a resultados insatisfatórios.

1.2 Objetivos

Este estudo apresenta um sistema de planejamento gerencial que busca a otimização da colheita florestal.

Especificamente pretende-se:

- preparar um modelo de decisão no planejamento da colheita florestal que minimize custos;
- simular situações de alocação ótima do trator florestal *feller-buncher* em florestas de rápido crescimento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A avaliação do desempenho de tratores florestais vem sendo realizada por vários autores e tem contribuído para aumentar a compreensão sobre as várias formas de se efetuar a colheita.

Valverde, Machado e Rezende (1996) efetuou a análise técnica do corte de madeira com o trator florestal derrubador-amontoador *feller-buncher*, dividindo o ciclo operacional em quatro elementos: deslocamento sem carga, abate, deslocamento entre árvores e deslocamento para descarregamento. Realizaram-se tomadas de tempo individuais, observando-se que a única variável que afetou diretamente o tempo de abate foi o volume de madeira por hectare. Assim, quanto menor o volume, menor o tempo de abate. Entretanto, apesar de consumir menos tempo no ciclo, foram nas glebas de menor volume por hectare que o *feller-buncher* produziu menos, em termos de volume de madeira por unidade de tempo, apresentando conseqüentemente os maiores custos por volume de madeira cortado.

Valverde Machado e Souza (1996), analisando o trator florestal arrastador *skidder*, observou que a sua capacidade de produção (volume de madeira extraído por unidade de tempo) foi afetada pelo volume de madeira por hectare e pela distância de arraste, obtendo-se os maiores valores, e conseqüentemente, os menores custos em classes de volume por hectare mais alto e nas faixas de menor distância de arraste.

Conforme Davis e Johnson (1987), a partir da década de 1970 a solução de problemas de planejamento florestal através do uso de programação linear incrementou-se rapidamente e, desde então, uma grande variedade de *softwares*

vem sendo desenvolvidos para este fim, como é o caso do SIMAC, MAX MILLION, RAM, TREES, ECHO, MUSYC e FORPLAN, dentre outros.

A programação linear vem sendo utilizada para solucionar problemas em sistemas agroindustriais e agroflorestais há bastante tempo. Este fato é reforçado principalmente pela complexidade destes sistemas e pelo grande número de inter-relações nos diversos subsistemas que os compõem.

Soffner, Milan e Rípoli (1993) desenvolveram um modelo de programação linear para maximizar a renda líquida, definindo o grupo de máquinas que realizará as operações desde o preparo do solo até a colheita, levando-se em consideração o seu desempenho operacional.

Vários autores têm utilizado esta técnica no planejamento de corte de florestas de clima temperado cuja produção é destinada principalmente para a indústria de celulose. Ware e Clutter (1971) elaboraram um modelo de programação linear para realizar a programação da colheita em florestas industriais de *pinus* no Sudeste dos EUA, utilizando restrições de disponibilidade de mão-de-obra. Esta restrição segue a mesma linha de restrição de disponibilização de máquinas já que a limitação de força de trabalho tem características semelhantes.

Nelson, Brodie e Sessions (1991) e Jones, Meneghin e Kirby (1991) utilizaram *Mixed Integer Programming* (MIP) na construção de modelos de apoio ao planejamento a curto prazo da colheita de florestas de clima temperado, sugerindo corte raso e utilizando restrição de fluxo de madeira. Esta técnica é empregada para garantir que, desde que determinada unidade seja eleita para ser cortada em determinada data, toda sua área seja utilizada e não apenas uma parte dela. A definição de que toda a área das unidades de corte seja selecionada é fundamental para aproximar o resultado do modelo matemático a situações reais, em que a área mínima a ser colhida deve coincidir com a unidade de corte.

Em alguns países de clima temperado onde ocorre uma maior preocupação com o meio ambiente, o monitoramento dos cortes florestais é realizado de maneira a minimizar impactos à fauna. Jones, Meneghin e Kirby (1991) utilizaram MIP no planejamento florestal a longo prazo em florestas federais nos EUA, utilizando restrição de adjacência e reduzindo a incidência de cortes em florestas vizinhas com o objetivo de reduzir o impacto ambiental. A restrição de adjascência considera cada gleba como uma unidade de corte e contempla a relação entre as glebas adjacentes, considerando a floresta como um sistema com interações internas e externas.

A implementação de avaliação operacional de máquinas florestais e o uso de programação linear vêm sendo bastante estudados, porém de forma isolada. O uso de MIP aliado a avaliação operacional de máquinas florestais poderá se tornar um instrumento bastante útil na construção de ferramentas eficazes para apoio ao planejamento florestal.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo e fonte de dados

A área florestal estudada pertence à empresa MANESMANN FLORESTAL (MAFLA) e localiza-se próximo à cidade de Bocaiúva no norte do estado de Minas Gerais, ocupando um total de 47.577 ha, sendo que 33.456 ha estão plantados com eucalipto. O departamento de planejamento da empresa forneceu os principais dados para este trabalho¹. Foi utilizado como fonte o inventário pré-corte, que é um preparatório para o planejamento de colheita, no qual são levantadas todas as glebas disponíveis para colheita e suas características de volume de madeira, localização, incremento anual, entre outras. O rendimento do trator florestal *feller-buncher* foi obtido após análises em diferentes níveis de produtividade de floresta. Os dados de consumo de combustível, mão-de-obra dos operadores, manutenção e reparos foram levantados a partir da planilha de controle de gastos da máquina e convertidos em dólar, devido à estabilidade desta moeda.

A colheita de madeira é realizada por um conjunto de máquinas denominado “módulo de colheita”, que é responsável pelas operações de corte, extração, carregamento e transporte da madeira até os fornos de carbonização. A madeira produzida é inteiramente destinada à produção de carvão que é utilizado como fonte de energia para siderurgia. No caso estudado, era utilizado o “módulo de colheita” de madeira com sistema totalmente mecanizado: corte efetuado pelo trator florestal *feller-buncher*, extração por *skidder*, desdobramento e carregamento pela garra traçadeira.

3.2 Modelo teórico

Segundo Reis (1997), a análise de custos tem como principal finalidade avaliar a rentabilidade dos recursos empregados em uma atividade produtiva. Esta avaliação fornece ao empresário um indicativo para a escolha das linhas de produção a serem adotadas e seguidas, o que permite à empresa dispor e combinar os recursos utilizados na produção, visando apurar melhores resultados econômicos.

Os custos são classificados em fixos e variáveis. Os custos fixos são aqueles correspondentes aos recursos que têm duração superior ao curto prazo, portanto, sua renovação só se verifica a longo prazo. Não se incorporam totalmente no produto a curto prazo, fazendo-o em tantos ciclos quanto permitir sua vida útil e não são facilmente alteráveis no curto prazo. Os custos variáveis têm duração inferior ou igual ao curto prazo, incorporam-se totalmente ao produto e são alteráveis, podendo provocar variações na quantidade e qualidade do produto dentro do ciclo.

Para a atividade florestal, o custo da madeira normalmente é dividido por operações, estimando-se o custo de determinada operação por unidade de volume de madeira. No caso de operações mecanizadas, estima-se o custo-hora da máquina que, em confronto com sua capacidade produtiva, possibilita a estimativa do custo de produção.

De acordo com Mialhe (1974), “o custo-hora de tratores representa o valor das despesas efetuadas por um trator durante uma hora, podendo ser dividido em gastos fixos (juros, depreciação, alojamento, etc.) e gastos variáveis (combustíveis e lubrificantes, serviços mecânicos, peças de reposição e operadores)”. O custo hora pode ser dividido em custo-hora de planejamento e custo-hora efetivo, que diferem apenas na parcela dos gastos variáveis: para o

custo-hora de planejamento, os gastos variáveis são estimados e para o custo-hora efetivo, os gastos variáveis são obtidos a partir dos dados registrados nos documentos de controle.

Para se atingir uma maior eficiência em sistemas agroflorestais que adotam maiores níveis de mecanização, faz-se necessário o estudo das operações das máquinas. Segundo Mialhe (1974), este estudo permite a eleição de critérios racionais de escolha e manejo das máquinas, implementos e ferramentas que irão executá-las, envolvendo considerações sobre aspectos técnicos, tempos consumidos e custos envolvidos em sua execução.

Uma parcela do estudo das operações é composta pela análise operacional das máquinas, que mede o desempenho operacional da máquina agrícola ou florestal. Alguns parâmetros devem ser definidos na ocasião da determinação do desempenho das máquinas estudadas, para uma melhor compreensão dos resultados.

Uma forma de medir o desempenho operacional das máquinas é por meio da capacidade operacional, que pode ser definida como a quantidade de trabalho executado na unidade de tempo, podendo ser dividida em capacidade de campo e capacidade de produção. A capacidade de campo (CC) é aplicada a máquinas e implementos que, para executarem uma operação, devem deslocar-se no campo, cobrindo determinada área. Portanto, o trabalho executado é medido em área trabalhada por unidade de tempo. Já a capacidade de produção (CP) é aplicada a máquinas móveis ou estacionárias, cujo trabalho produtivo é medido em termos de peso ou volume de produção que sofreu a ação dos órgãos ativos, é expressa pela relação entre o peso ou volume de produto que foi trabalhado pelos órgãos ativos por unidade de tempo.

No presente estudo, o rendimento da máquina será representado pela capacidade de campo (CC), que é representada pela área trabalhada pelo trator

por intervalo de tempo e varia de acordo com o volume de madeira por hectare da floresta.

Conway (1976) descreve a exploração florestal como um sistema composto por subsistemas, proporcionando resultados de acordo com sua interação interna. Segundo Tanaka (1986), trata-se do conjunto de operações efetuadas no maciço florestal, visando preparar e transportar a madeira até o seu local de utilização, utilizando-se técnicas e padrões estabelecidos e tendo como finalidade transformá-la em produto final.

A exploração florestal pode ser descrita como um sistema composto por subsistemas. Os subsistemas de maior importância são o corte, a extração, o carregamento, o transporte e o descarregamento. Estes cinco subsistemas estão encadeados, constituindo um sistema maior, que proporciona resultados de acordo com sua interação interna (Conway, 1976).

Para Clutter, Fortson e Pienaar (1983), o processo de tomada de decisão em empresas florestais pode ser dividido em quatro etapas distintas: reconhecimento do problema, especificação de estratégias, especificação de um critério de decisão e seleção da estratégia ótima. Afirmam os autores que o gerenciamento florestal pode ser dividido em duas categorias: gestão de estande e gestão de floresta. No primeiro caso, o gerenciamento é efetuado de maneira independente para cada estande, desconsiderando suas interações e, por isso, raramente é utilizado. A gestão de floresta deve coordenar e considerar todos estandes da floresta em questão, além de suas interações físicas e econômicas como fluxo de madeira, disponibilidade de equipamentos e mão-de-obra, dentre outras.

De acordo com Machado (1994), o planejamento florestal deve ser elaborado através de uma metodologia científica, apoiando-se em condições lógicas por meio de dados coletados em situações reais e, quando possível,

extrapolados para novas situações. O fluxo de madeira está diretamente ligado à demanda da empresa que é um fator decisivo na intensidade da exploração, tornando importante o dimensionamento de todas as máquinas e equipamentos florestais necessários para que não haja um estrangulamento dos processos empregados na exploração.

Para esse mesmo autor, são três os principais métodos de planejamento da colheita florestal: a) método da tentativa: baseia-se em fatos e atos semelhantes em situações passadas, podendo surgir situações em que o planejador decidirá intuitivamente ou por suposições em virtude da ausência, em sua vida profissional, de ocasiões semelhantes; b) método imitativo: o planejador procura subsídios em outras empresas florestais, pois lhe consumirá pouco tempo e recurso, embora haja risco de não acertar, em virtude de basear-se em adivinhações, palpites e opiniões de outras pessoas; c) método científico: se apóia em condições lógicas, por meio de dados coletados em situações reais e, quando possível, extrapolados para novas situações.

3.3 Modelo de análise

Neste estudo foi elaborado o modelo matemático APCF 1, utilizando-se *Mixed Integer Programming* (MIP), descrito como uma combinação de variáveis contínuas e variáveis discretas sendo as variáveis inteiras do tipo zero-um (0-1).

O intervalo de tempo contemplado foi de dois anos, enquadrando-se na categoria de curto prazo, especificando-se as unidades de corte para cada ano. O modelo desenvolvido considera a inter-relação entre as áreas florestadas, caracterizando-se, portanto, a gestão de floresta.

O modelo de apoio à tomada de decisão APCF 1 está representado na Figura 1. Este modelo foi desenvolvido para apoiar a elaboração do cronograma de colheita florestal em que se deve definir dentre as glebas que estão disponíveis para corte, quais deverão ser colhidas e em qual seqüência. Ele funciona através de alguns dados de entrada como: glebas disponíveis para corte, custo-hora-máquina e capacidade de campo do trator florestal *feller-buncher*.

Estes dados formam a base de informações necessárias para o funcionamento do modelo e são desdobrados para se chegar até as variáveis de decisão deste estudo.

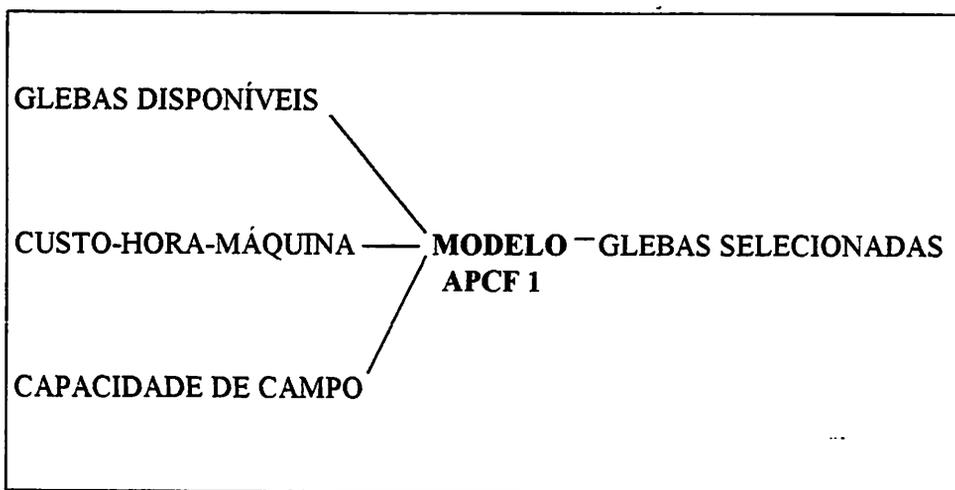


FIGURA 1 - Fluxograma do modelo de Apoio ao Planejamento da Colheita Florestal - APCF 1.

3.3.1 *Mixed Integer Programming (MIP)*

Para Nelson, Brodie e Sessions (1991), os modelos matemáticos utilizados no planejamento da colheita florestal dividem-se em duas categorias: a primeira envolve modelos para o planejamento da colheita florestal a longo prazo ou planejamento estratégico, o que inclui várias rotações, estimando-se o volume que deverá ser cortado para cada década, utilizando-se médias de produtividade e de custo. Nesta categoria não se chega ao detalhamento de estandes. Na segunda categoria, os modelos visam o planejamento da colheita florestal a curto prazo ou planejamento tático, especificando-se as unidades de corte para cada período. Neste caso, deve-se preocupar com a inter-relação entre as unidades de corte, o que normalmente gera novas restrições.

Uma das principais limitações do uso de programação linear diz respeito ao pressuposto de linearidade dos processos produtivos, em que todas as relações do problema devem ser expressas na forma de equações lineares. Em situações práticas, nem sempre se observa a condição de linearidade, o que impõe a necessidade de se utilizar outras técnicas de pesquisa operacional como programação não-linear, programação inteira e uma associação de programação linear com programação inteira denominada *Mixed Integer Programming (MIP)*.

A técnica de programação inteira pode ser utilizada para situações em que as variáveis devem assumir valores inteiros, como no caso da produção de automóveis, alocação de depósitos ou ainda no caso da determinação das glebas que serão colhidas em uma floresta. Pode-se também utilizar programação inteira para a solução de modelos com variáveis de decisão do tipo zero-um (0-1), que sempre assumem o valor zero ou o valor um.

A utilização de variáveis tipo zero-um pode ocorrer em problemas de custo de ajustamento, em que x representa a quantidade de certo produto que será

manufaturado com um custo marginal por unidade de C_1 . Neste caso, se a decisão for de produzi-lo, haverá um custo de ajustamento que deverá ser adicionado ao custo total de C_2 . Portanto, se a quantidade a ser manufaturada (x) for igual a zero, o custo total será igual a zero, enquanto que se a quantidade manufaturada for maior que zero, o custo total será igual ao custo marginal mais o custo de ajustamento ($C_1 x + C_2 y$). O custo de ajustamento difere do custo marginal porque seu valor não aumenta proporcionalmente à quantidade manufaturada x . Ou seja, seu valor estará vinculado à variável y que assume valores zero ou um, dependendo do valor da variável x . Se a variável x for igual a zero, a variável y também será zero e, conseqüentemente, o custo de ajustamento será nulo. Se a variável x for maior que zero, a variável y será igual a 1 e o custo de ajustamento será igual a C_2 .

3.3.2 Operacionalização do modelo

Alguns passos deverão ser seguidos para se equacionar os dados de entrada e suas inter-relações. No primeiro passo, define-se o custo hora total do trator *feller-buncher*, que representa o somatório entre o custo fixo e o variável pelo número de horas totais, incluindo-se o tempo em que a máquina encontra-se parada, por motivos técnicos ou operacionais.

Para a transformação do custo hora total em custo hora efetiva deve-se considerar o índice de eficiência operacional, que segundo Machado (1994), representa o percentual do tempo total que a máquina efetivamente trabalha, considerando os tempos de parada. O autor sugere a utilização do índice de 0,675, ou seja, considera-se que o trator trabalha 67,5% do tempo total.

O custo fixo foi calculado pela soma entre juros e depreciação. As expressões para cálculo de juros e depreciação são as seguintes:

(a) juros (J)

$$J = \frac{VM * i}{HT} \quad e \quad (1)$$

$$VM = \frac{VA + VR}{2} , \quad (2)$$

(b) depreciação (D)

$$D = \frac{VA - VR}{P} , \quad (3)$$

em que:

J = custo com juros do maquinário (US\$/hora);

VM = valor médio do maquinário;

i = taxa de juros (6% a.a.);

HT = número de horas totais em um ano (8760 horas);

VR = valor de revenda do maquinário (US\$).

D = custo com depreciação do maquinário (US\$);

VA = valor de aquisição do maquinário (US\$); e

PD = período de depreciação do maquinário (horas totais).

De acordo com Mialhe (1974), a parcela de depreciação incluída nos recursos fixos representa a formação de um fundo de reserva para aquisição de um recurso novo de mesmo tipo e características. Dentre os custos variáveis consideram-se os gastos com operadores do trator florestal (US\$), as despesas com consumo de combustível por hora total (US\$), os gastos com lubrificantes por hora total (US\$) e a manutenção por hora total (US\$).

O segundo passo para operacionalizar o modelo é a definição do rendimento do trator para diferentes níveis de produtividade das glebas, ou seja a capacidade de campo (CC). Este indicador é representado pela área trabalhada pelo trator por intervalo de tempo e varia de acordo com o volume de madeira por hectare da floresta. A unidade de volume de madeira utilizada em empresas florestais é o estéreo (st) que representa uma medida de metro cúbico de madeira, considerando os espaços vazios decorrentes do empilhamento.

A empresa estudada forneceu dados de rendimento do trator para 9 níveis de produtividade, variando de 60 a 260 estéreos por hectare.

No terceiro passo tem-se o cálculo do custo de corte por hectare para diferentes níveis de produtividade de floresta, para as quais o trator florestal apresenta diferentes rendimentos (capacidade de campo). Portanto, o custo de corte por hectare também varia com a variação da produtividade da floresta, o que é decisivo na seleção das glebas que deverão ser cortadas, sendo utilizado pelo modelo como coeficiente (C_{ij}) da variável de decisão. Seu cálculo depende do custo hora da máquina e do número de hectares cortados em uma hora, ou seja, a capacidade de campo, como sugere a expressão:

$$C_{ij} = \frac{Ch_t}{CC} \quad , \quad (4)$$

em que:

Ch_t = custo hora total do trator florestal (US\$/h_t);

CC = capacidade de campo (ha/h_t).

Portanto, para cada nível de produtividade haverá um coeficiente de custo de corte.

O custo de ajuste caracteriza a programação inteira com variáveis do tipo 0-1 e não depende do custo de corte. A variável inteira está vinculada à gleba que for selecionada para corte, agregando automaticamente um valor inteiro à função objetivo. Seu valor pode ser individual para cada gleba, como o custo de transporte das máquinas que depende das distâncias, ou pode ser o mesmo valor para todas as glebas.

Para o caso estudado, o custo de ajuste foi considerado igual para todas as glebas com o valor de US\$ 100,00. Desta forma, este valor tem o efeito de diminuir a tendência de escolha de áreas muito pequenas, já que proporcionalmente sua participação no custo final será maior.

O quarto e último passo refere-se à definição das variáveis de decisão. A empresa estudada possui 47.577 hectares de florestas plantadas e a cada período deve disponibilizar uma parte da floresta para ser cortada. A área de floresta disponibilizada é dividida em glebas com diferentes produtividades e, conseqüentemente, com diferentes custos de corte por hectare

Esta empresa disponibilizou 204 glebas para serem selecionadas para corte em dois anos. Na Tabela 1 é possível observar alguns exemplos de como se caracteriza a variável de decisão X_{ij} que é representada pela gleba disponível i para ser cortada no ano j . A gleba 29 apresenta a possibilidade de corte no ano 1 ($X_{29\ 1}$) com uma produtividade de 147 estéreos por hectare e com um custo de corte de US\$ 56,00 por hectare.

O incremento representa o ganho em volume de madeira por hectare, estimado para a possibilidade de corte da gleba no segundo ano, já que a floresta continua em crescimento. Percebe-se que para a variável $X_{33\ 2}$, que representa a gleba 33 para corte no ano 2, tem-se 30 estéreos de incremento por hectare que são acrescentados na produtividade inicial da gleba 33 que era de 159 st/ha passando para 189.

As glebas disponíveis foram divididas em diferentes classes de produtividade que variam de 55 a 255 st/ha, com uma mudança de classe a cada 10 unidades. Para as diferentes classes estão associados diferentes custos de corte por hectare.

Dentre as glebas disponíveis para corte, serão selecionadas aquelas que poderão ser cortadas no primeiro ano (julho de 1999 a junho de 2000) e no segundo ano (julho de 2000 a junho de 2001), apoiando, portanto, o planejamento e a elaboração do cronograma de plantio.

TABELA 1 - Alguns exemplos das variáveis de decisão e coeficientes de custos na empresa em estudo.

| Gleba | Área (ha) | Incremento (st/ha) | Produtividade (st/ha) | Classe de produtividade | Custo de corte (US\$/ha) |
|-------------------|-----------|--------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|
| X _{29 1} | 37 | 0 | 147 | 145 | 56 |
| X _{31 1} | 36 | 0 | 149 | 145 | 56 |
| X _{34 1} | 25 | 0 | 162 | 165 | 61 |
| X _{35 1} | 49 | 0 | 165 | 165 | 61 |
| X _{33 2} | 19 | 30 | 184 | 185 | 67 |

3.3.3 Modelo matemático APCF 1

Uma empresa florestal deve gerenciar o seu ativo florestal para garantir que se tenha, em todos os anos, glebas sendo plantadas, glebas em manutenção e glebas sendo colhidas. O planejador deve definir a extensão de área que será plantada todos os anos e , para isso deve estimar o volume de madeira de que necessitará nos próximos 5 a 10 anos, que representam o tempo aproximado do plantio ao corte de uma floresta de eucalipto. Das glebas que estão sendo mantidas, uma parte deverá ser escolhida para ser cortada, enquanto o restante continuará em manutenção e crescimento para corte futuro. A definição das glebas que serão colhidas com suas respectivas datas de corte constitui o plano de colheita florestal.

O modelo de Apoio ao Planejamento da Colheita Florestal (APCF 1) serve de suporte na tomada de decisão por ocasião da elaboração do plano de colheita para florestas plantadas.

O modelo matemático deste estudo pode ser expresso por:

MINIMIZAR

$$Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (C_{ij} \cdot X_{ij} + CC_{ij} \cdot Y_{ij}) \quad (5)$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J V_{ij} \cdot X_{ij} \geq VT_j \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ij} \leq A_i \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} X_{ij} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J A_i \cdot Y_{ij} \leq 0 \quad (8)$$

em que:

C_{ij} = custo de corte de 1 ha da gleba i no momento j ;

X_{ij} = número de hectares cortados na gleba i no momento j ;

CC_{ij} = custo de ajustamento para iniciar corte na gleba i no momento j ;

Y_{ij} = variável tipo zero-um ligada ao custo de ajuste da gleba i no momento j ;

V_{ij} = volume de madeira em 1 ha da gleba i no momento j ;

VT_j = volume total mínimo de madeira cortada no período j ;

A_i = área em hectares da gleba i ;

3.3.4 Interação entre as variáveis do modelo APCF 1

A função objetivo refere-se à minimização dos custos envolvidos na colheita florestal apoiando, portanto, o planejamento por ocasião da tomada de decisão sobre quais glebas serão colhidas no período j . O período j pode ser qualquer subdivisão de intervalo de tempo. Para o caso estudado, considerou-se um ano como subdivisão de um período de dois anos, ou seja, todas as glebas têm a possibilidade de serem colhidas no ano 1 ou no ano 2. A variável de decisão (X_{ij}) refere-se ao número de hectares cortados na gleba, enquanto a variável de ajuste (Y_{ij}), por ser do tipo 0-1 e, portanto, inteira, está ligada aos custos de ajuste.

Desta forma, a mesma gleba gera duas variáveis de decisão: X_{11} e X_{12} , ou seja, o número de hectares colhidos na gleba 1 no ano 1 e número de hectares cortados na gleba 1 no ano 2. Nas glebas eleitas para corte será realizado corte raso, ou seja, toda madeira da gleba será extraída.

A restrição de volume (6) restringe o volume total a ser colhido como maior ou igual ao mínimo demandado para o período em questão. Já a restrição de área assegura que a área cortada de determinada gleba não exceda o seu tamanho total. A restrição de ajuste possibilita acrescentar os custos não lineares ao modelo.

O modelo tem como meta principal atingir o volume de madeira demandado com o menor custo de corte. Para o caso estudado, existem 204 glebas que podem ser escolhidas em dois anos para atingir este volume, com diferentes localizações e diferentes produtividades, possibilitando uma infinidade de combinações. A restrição de volume assegura esta meta, fazendo com que o volume de madeira totalizado pelas glebas selecionadas seja igual ao volume demandado para cada ano.

A gleba selecionada deve ser completamente cortada e o número de hectares cortado não deve exceder ao seu tamanho. Para que isto ocorra, a restrição de área limita o número de hectares cortados na gleba selecionada, a no máximo, o seu tamanho. Esta condição é reforçada pela restrição de ajuste que acrescenta o custo de US\$ 100,00 por hectare à função objetivo, independente do número de hectares cortados na gleba.

Devido à restrição 8, a variável Y_{ij} assumirá sempre os valores 0 ou 1. Este resultado ocorre porque na restrição de ajuste o primeiro fator deve ser sempre menor ou igual a zero. Quando a gleba X_{ij} não for selecionada, o seu valor será igual a zero e, conseqüentemente, a variável Y_{ij} também será nula; mas, quando seu valor for maior que zero, X_{ij} será igual a A_{ij} , que é o próprio coeficiente da variável Y_{ij} , o que obriga a variável Y_{ij} a ser igual a 1 devido ao fato do segundo membro da equação 8 ser nulo.

Diante disso, a escolha de uma gleba para corte parcial implicará na diluição do valor fixo para um número menor de hectares, o que resultará em um maior custo para esta opção. Desta forma, a solução ótima busca a definição da gleba inteira para corte, fazendo com que X_{ij} se torne igual A_{ij} .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente será apresentado o custo hora do trator florestal *feller-buncher*. Em seguida será discutida a relação entre o volume de madeira em cada gleba e o seu respectivo custo de corte. Finalmente, será demonstrada a elaboração do planejamento bianual da colheita florestal através do modelo de Apoio ao Planejamento da Colheita Florestal (APCF 1) e os resultados deste planejamento.

4.1 Custo-hora do trator *feller-buncher*

Considerando uma taxa real de juros de 6 % ao ano, o custo-hora-total do *feller-buncher* foi de US\$ 17,27. Este valor não leva em consideração os tempos de parada fazendo necessário o uso do índice de eficiência operacional. Este índice é utilizado para transformar o tempo total no tempo efetivamente trabalhado pela máquina. Utilizou-se neste trabalho o índice de 0.675 como base de cálculo do custo-hora efetivamente trabalhada, encontrando-se o valor de US\$ 25,58.

Analisando a Tabela 2, observa-se que entre os itens que compõem os custos variáveis, o gasto com combustível apresentou a maior participação, sendo de 32% do custo total do trator florestal *feller-buncher*, seguido por operadores, com 26%, manutenção e reparos 13%, e lubrificantes 2%. Os custos fixos representaram 27% do custo total, com 22% para a depreciação e 5% para os juros.

TABELA 2 - Descrição do itens de custo que compõem o custo total do trator florestal *feller-buncher* utilizado na empresa em estudo, 1998.

| Itens | Custo (US\$/hora total) | % |
|-----------------------|-------------------------|--------------|
| Operadores | 4.43 | 25,66 |
| Combustível | 5.43 | 31,45 |
| Lubrificantes | 0.37 | 2,15 |
| Manutenção e reparos | 2.32 | 13,43 |
| Custo variável | 12.55 | 72,66 |
| Juros | 0.85 | 4,9 |
| Depreciação | 3.87 | 22,5 |
| Custo fixo | 4.72 | 27,33 |
| Custo total | 17.27 | 100 |

Fonte: Dados de Pesquisa

4.2 Relação entre a produtividade e o custo de corte.

O custo de corte representa o valor gasto para se cortar um hectare de floresta. Este valor foi calculado considerando-se o tempo gasto para efetuar o corte de um hectare (capacidade de campo) e o custo hora do trator florestal.

Como pode ser observado na Tabela 3, a capacidade de campo tende a diminuir com o aumento da produtividade da floresta, ou seja, trabalha-se menos área por unidade de tempo, já que no espaço de um hectare haverá um maior volume de madeira, obrigando o trator florestal a realizar mais operações.

TABELA 3 - Variação da capacidade de campo do trator florestal *feller-buncher* em diferentes níveis de produtividade de florestas na empresa em estudo, 1998 .

| Produtividade da gleba (st/ha) | Capacidade de campo (ha/h) |
|--------------------------------|----------------------------|
| 60 | 0.44 |
| 85 | 0.41 |
| 110 | 0.45 |
| 135 | 0.45 |
| 160 | 0.40 |
| 185 | 0.37 |
| 210 | 0.35 |
| 235 | 0.33 |
| 260 | 0.31 |

Fonte: Dados de pesquisa

Desta forma, o custo de corte por hectare tende a aumentar com o aumento do volume de madeira da floresta, como observado na Tabela 4.

TABELA 4 - Custo de corte por hectare e custo de corte por estéreo de madeira para diferentes níveis de produtividade de florestas na empresa em estudo, 1998.

| Produtividade (st/ha) | Custo de corte (US/ha) | Custo por estéreo (US/100 st) |
|-----------------------|------------------------|-------------------------------|
| 55 | 44.55 | 81.0 |
| 65 | 50.05 | 77.0 |
| 75 | 56.25 | 75.0 |
| 85 | 62.05 | 73.0 |
| 95 | 58.90 | 62.0 |
| 105 | 60.90 | 58.0 |
| 115 | 55.20 | 48.0 |
| 125 | 55.00 | 44.0 |
| 135 | 55.35 | 41.0 |
| 145 | 56.55 | 39.0 |
| 155 | 58.90 | 38.0 |
| 165 | 61.87 | 37.5 |
| 175 | 64.75 | 37.0 |
| 185 | 67.52 | 36.5 |
| 195 | 68.25 | 35.0 |
| 205 | 70.93 | 34.6 |
| 215 | 73.53 | 34.2 |
| 225 | 75.60 | 33.6 |
| 235 | 77.08 | 32.8 |
| 245 | 78.89 | 32.2 |
| 255 | 80.58 | 31.6 |

Fonte: Dados de pesquisa

Comparando-se o custo de corte com o custo por estéreo de madeira em diferentes níveis de produtividade (Tabela 4), percebe-se, que com o aumento dos níveis de produtividade, o custo por estéreo decresce. Esta relação existe porque, apesar de o trator trabalhar mais lentamente com relação a área, ou seja, gastar mais tempo para cortar um hectare em florestas de maior volume de madeira (produtividade), ele corta um maior volume por hora. Como a base do cálculo de custo de corte está representada no custo hora da máquina, o custo por estéreo tende a diminuir.

O custo de corte por hectare foi utilizado no modelo como coeficiente de custo (C_{ij}) da variável de decisão (X_{ij}). Portanto, como a proposta do modelo é minimizar custo, pode-se afirmar que as glebas escolhidas seriam aquelas de menor custo por hectare. Porém, o modelo possui a restrição de volume, conforme expressão (6) que obriga a solução ótima a atender o volume de madeira que será demandado.

O modelo trabalhou tentando encontrar a seleção de glebas que será cortada para atingir o volume de madeira demandado com o menor custo de corte total possível. Para melhor visualização entre custo de corte por hectare e custo de corte por estéreo, a Figura 2 apresenta os dados da Tabela 4, onde percebe-se a relação inversa entre estes itens de custo.

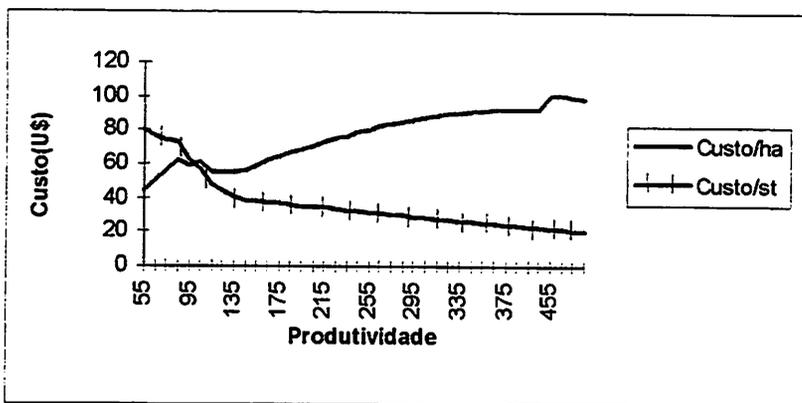


FIGURA 2 - Custo de corte por hectare e custo de corte por estéreo de madeira para diferentes níveis de produtividade das glebas na empresa em estudo, 1998-1999.

Com maiores níveis de produtividade da floresta, o custo de corte por volume de madeira decresce e, por conseguinte, torna-se menos onerosa a operação da máquina, ou seja, consegue-se o volume de madeira com menor tempo de operação da máquina e com conseqüente menor custo de corte. Se as variáveis do modelo se resumissem a estas relações, bastaria escolher as glebas com maiores volumes e assim se obteria o menor custo de corte para a empresa. Porém, o modelo APCF 1 leva em consideração a possibilidade de se colher uma floresta em dois períodos. No primeiro período, o volume de madeira por hectare (produtividade) é o volume atual e, no segundo período, considera-se o crescimento (incremento) da floresta até o momento em que ela será colhida.

4.3 Planejamento da colheita florestal através do modelo de Apoio ao Planejamento da Colheita Florestal (APCF 1)

As glebas disponíveis para corte e seus dados de área e produtividade foram fornecidas pela empresa estudada. Foram disponibilizadas para corte 204 glebas, perfazendo um total de 6020 ha com um volume de madeira total de 918.374 st. Para os períodos em questão, a empresa apresentava uma demanda de 258.000 st de madeira no primeiro ano (julho 1999 - junho 2000) e 270.000 st no segundo (julho 2000 - junho 2001) com o objetivo de produzir carvão suficiente para atender a demanda da siderúrgica.

Para a empresa estudada, das 204 glebas disponíveis foram geradas 408 variáveis, o que se deve à possibilidade de corte das glebas em dois momentos distintos (ano 1 e ano 2). Como esta simulação considera 2 anos, existem 3 possibilidades para cada variável: ser eleita para corte no primeiro ano, ser eleita para o segundo e não ser eleita para nenhum dos dois anos.

Para o primeiro ano de planejamento, o modelo selecionou 46 das 204 glebas disponíveis, perfazendo um total de 258.000 st, enquanto que, para o segundo ano, selecionou 42 glebas, perfazendo 270.000 st. Neste sentido, atingiu-se o volume de madeira demandado para os dois períodos.

A minimização do custo de corte na elaboração do plano de colheita do ano 1 e do ano 2 para a empresa estudada encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 5 e 6.

A Tabela 5 representa a solução ótima para aquelas glebas que deverão ser colhidas no primeiro ano e a Tabela 6 no segundo ano. A variável X_{ij} representa a área da gleba i selecionada para ser colhida no ano j . O número correspondente ao índice i é a própria numeração das glebas disponíveis, enquanto o índice j representa 1 para o primeiro ano e 2 para o segundo.

TABELA 5 - Glebas selecionadas para compor o cronograma de corte da empresa em estudo no ano 1(1999-2000).

| Gleba | Área (ha) | Incremento (st/ha) | Produtividade (St/ha) | Classe | Custo de corte (US/ha) |
|---------|-----------|--------------------|-----------------------|--------|------------------------|
| X 29 1 | 37 | 0 | 147 | 145 | 56 |
| X 31 1 | 36 | 0 | 148 | 145 | 56 |
| X 32 1 | 41 | 0 | 149 | 145 | 56 |
| X 34 1 | 25 | 0 | 159 | 155 | 58 |
| X 35 1 | 49 | 0 | 162 | 165 | 61 |
| X 41 1 | 41 | 0 | 179 | 175 | 64 |
| X 42 1 | 14 | 0 | 186 | 185 | 67 |
| X 43 1 | 11 | 0 | 194 | 195 | 68 |
| X 44 1 | 16 | 0 | 205 | 205 | 70 |
| X 45 1 | 42 | 0 | 209 | 205 | 70 |
| X 46 1 | 10 | 0 | 219 | 215 | 73 |
| X 49 1 | 22 | 0 | 269 | 265 | 82 |
| X 53 1 | 46 | 0 | 210 | 205 | 70 |
| X 57 1 | 32 | 0 | 176 | 175 | 64 |
| X 60 1 | 28 | 0 | 199 | 195 | 68 |
| X 61 1 | 24 | 0 | 191 | 195 | 68 |
| X 63 1 | 37 | 0 | 200 | 195 | 68 |
| X 64 1 | 32 | 0 | 152 | 155 | 58 |
| X 68 1 | 24 | 0 | 156 | 155 | 58 |
| X 69 1 | 13 | 0 | 229 | 225 | 75 |
| X 79 1 | 33 | 0 | 217 | 215 | 73 |
| X 121 1 | 26 | 0 | 150 | 145 | 56 |
| X 124 1 | 24 | 0 | 228 | 225 | 75 |
| X 126 1 | 37 | 0 | 205 | 205 | 70 |
| X 131 1 | 38 | 0 | 163 | 165 | 61 |
| X 132 1 | 34 | 0 | 169 | 165 | 61 |
| X 136 1 | 39 | 0 | 157 | 155 | 58 |
| X 138 1 | 38 | 0 | 156 | 155 | 58 |
| X 140 1 | 39 | 0 | 196 | 195 | 68 |
| X 141 1 | 27 | 0 | 157 | 155 | 58 |
| X 142 1 | 38 | 0 | 163 | 165 | 61 |
| X 145 1 | 37 | 0 | 150 | 145 | 56 |
| X 146 1 | 36 | 0 | 150 | 145 | 56 |
| X 148 1 | 38 | 0 | 209 | 205 | 70 |
| X 153 1 | 36 | 0 | 218 | 215 | 73 |
| X 154 1 | 39 | 0 | 220 | 215 | 73 |
| X 155 1 | 34 | 0 | 192 | 195 | 68 |
| X 164 1 | 37 | 0 | 161 | 165 | 61 |
| X 165 1 | 34 | 0 | 170 | 165 | 61 |
| X 177 1 | 18 | 0 | 234 | 235 | 77 |
| X 182 1 | 13 | 0 | 161 | 165 | 61 |
| X 183 1 | 24 | 0 | 199 | 195 | 68 |
| X 184 1 | 18 | 0 | 208 | 205 | 70 |
| X 192 1 | 25 | 0 | 168 | 165 | 61 |
| X 194 1 | 25 | 0 | 185 | 185 | 67 |
| X 202 1 | 24 | 0 | 204 | 205 | 70 |

Fonte: Dados de pesquisa

TABELA 6 - Glebas selecionadas para compor o cronograma de corte da empresa em estudo no ano 2 (2000-2001)

| Gleba | Area (ha) | Incremento (st/ha) | Produtividade (st/ha) | Classe | Custo de corte (US/ha) |
|---------|-----------|--------------------|-----------------------|--------|------------------------|
| X 33 2 | 19 | 30 | 184 | 185 | 67 |
| X 37 2 | 5 | 34 | 207 | 205 | 70 |
| X 38 2 | 15 | 34 | 208 | 205 | 70 |
| X 39 2 | 27 | 34 | 208 | 205 | 70 |
| X 47 2 | 27 | 46 | 280 | 275 | 84 |
| X 48 2 | 27 | 51 | 308 | 305 | 87 |
| X 50 2 | 34 | 54 | 328 | 325 | 89 |
| X 51 2 | 6 | 55 | 335 | 335 | 90 |
| X 52 2 | 19 | 59 | 355 | 355 | 91 |
| X 56 2 | 37 | 32 | 194 | 195 | 68 |
| X 58 2 | 35 | 45 | 275 | 275 | 84 |
| X 62 2 | 11 | 44 | 264 | 265 | 82 |
| X 67 2 | 4 | 56 | 336 | 335 | 90 |
| X 70 2 | 36 | 63 | 381 | 385 | 92 |
| X 71 2 | 8 | 65 | 394 | 395 | 92 |
| X 72 2 | 9 | 51 | 308 | 305 | 87 |
| X 76 2 | 8 | 47 | 286 | 285 | 85 |
| X 77 2 | 20 | 70 | 421 | 395 | 92 |
| X 78 2 | 23 | 46 | 277 | 275 | 84 |
| X 80 2 | 15 | 73 | 438 | 395 | 92 |
| X 81 2 | 15 | 48 | 291 | 295 | 86 |
| X 82 2 | 8 | 59 | 357 | 355 | 91 |
| X 83 2 | 34 | 54 | 328 | 325 | 89 |
| X 84 2 | 25 | 50 | 305 | 305 | 87 |
| X 85 2 | 26 | 46 | 281 | 285 | 85 |
| X 86 2 | 21 | 50 | 300 | 295 | 86 |
| X 87 2 | 24 | 60 | 365 | 365 | 91 |
| X 88 2 | 11 | 42 | 256 | 255 | 80 |
| X 122 2 | 37 | 42 | 255 | 255 | 80 |
| X 123 2 | 23 | 44 | 265 | 265 | 82 |
| X 129 2 | 38 | 34 | 209 | 205 | 70 |
| X 133 2 | 38 | 34 | 208 | 205 | 70 |
| X 139 2 | 29 | 42 | 255 | 255 | 80 |
| X 144 2 | 26 | 46 | 276 | 275 | 84 |
| X 150 2 | 25 | 55 | 336 | 335 | 90 |
| X 151 2 | 37 | 42 | 255 | 255 | 80 |
| X 156 2 | 23 | 25 | 150 | 145 | 56 |
| X 179 2 | 20 | 47 | 283 | 285 | 85 |
| X 180 2 | 24 | 47 | 282 | 285 | 85 |
| X 185 2 | 26 | 42 | 254 | 255 | 80 |
| X 195 2 | 25 | 45 | 272 | 275 | 84 |
| X 201 2 | 24 | 44 | 267 | 265 | 82 |

Fonte: Dados de pesquisa

Algumas glebas disponíveis não foram selecionadas para corte em nenhum dos períodos de planejamento e devem permanecer em crescimento ou entrarem em uma nova otimização, se houver alguma mudança de cenário.

Analisando o resultado da sugestão de planejamento bianual feita pelo modelo APCF 1, foram construídas as Tabelas 7 e 8, de distribuição de frequência por níveis de produtividade.

Na Tabela 7 estão os níveis de produtividade (st/ha), o número de glebas selecionadas para cada nível de produtividade, o número total de glebas disponíveis por nível e o percentual das glebas selecionadas por nível de produtividade.

No ano 1 (Tabela 7) tem-se 84,8% das glebas selecionadas entre os níveis de 150 a 225 st/ha. Como pode ser observado na Tabela 7, existe uma distribuição com uma tendência de concentração entre os níveis de 150-175, 175-200, 200-225 st/ha.

TABELA 7 - Distribuição de frequência das glebas selecionadas pelo modelo APCF 1 para serem cortadas no ano 1 (1999-2000).

| Níveis de produtividade(st/ha) | <125 | 125-150 | 150-175 | 175-200 | 200-225 | 25-250 | >250 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|--------|------|
| N. de glebas selecionadas | 0 | 3 | 17 | 10 | 12 | 3 | 1 |
| N. de glebas totais | 81 | 32 | 27 | 12 | 21 | 13 | 18 |
| % de glebas selecionadas | 0 | 6,5 | 37 | 21,8 | 26,0 | 6,5 | 2,2 |

Fonte: Dados de pesquisa

TABELA 8 - Distribuição de frequência das glebas selecionadas pelo modelo APCF 1 para serem cortadas no ano 2 (2000-2001)

| Níveis de produtividade (st/ha) | <125 | 125-150 | 150-175 | 175-200 | 200-225 | 25-250 | >250 |
|---------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|--------|------|
| N. de glebas selecionadas | 0 | 0 | 1 | 2 | 5 | 0 | 34 |
| N. de glebas totais | 62 | 21 | 24 | 7 | 7 | 1 | 36 |
| % de Glebas Selecionadas | 0 | 0 | 2,3 | 4,7 | 12,0 | 0 | 81,0 |

Fonte: Dados de pesquisa

A distribuição da Tabela 7 indica que no ano 1, com as glebas disponíveis da empresa e suas respectivas características de produtividade e tamanho, a melhor escolha para corte encontra-se nestes níveis.

Um comportamento contrário é observado no ano 2 (Tabela 8), quando 81% das glebas selecionadas estão no nível de produtividade acima de 250 st/ha. Esta distribuição pode ser explicada pelo aumento do número de glebas que entram neste nível quando aumentam seus volumes de madeira, já que recebem o incremento na produtividade correspondente a um ano de crescimento, aliado ao fato de reduzir o número de glebas em níveis de produtividade inferiores, pois sua maioria foi selecionada no ano 1. Em ambos os casos, a incidência de seleção de glebas com produtividade abaixo de 150 st/ha foi baixa, o que indica que, abaixo deste nível, o custo de corte é alto.

Com a seleção realizada pelo modelo APCF 1 no primeiro ano, se o planejador seguir a proposta de glebas que deverão ser colhidas, o volume de 258.000 st será colhido a um custo de US\$ 91.942,00, conforme Tabela 9, enquanto que, no segundo ano, o volume de madeira demandado de 270.000 st será atingido com o custo de corte de US\$ 79.379,00. A empresa estudada utiliza como parâmetro intuitivo para definição da viabilidade da utilização da máquina, a escolha de glebas com níveis de produtividade acima de 100 st/ha.

Para facilitar a visualização da redução de custo com o uso do modelo APCF 1, foi realizada uma comparação em dois cenários. No cenário tradicional, as glebas escolhidas para corte estão entre 100 e 150 st/ha e no cenário otimizado foram utilizados os dados do resultado do modelo com glebas selecionadas entre os níveis de 125 e acima de 250 st/ha (Tabela 9).

TABELA 9 - Comparativo de custo de corte ótimo e tradicional para o período de planejamento, 1999-2001.

| US\$ | Ano 1 - 258.000 st | Ano 2 - 270.000 st |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Custo de corte ótimo | 91942,00 | 79379,00 |
| Custo/st ótimo | 0,356 | 0,293 |
| Custo de corte tradicional(150 st) | 163000,00 | 149349,00 |
| Custo/st tradicional(150 st) | 0,631 | 0,553 |
| Redução de custo | 71058,00 | 69970,00 |

Fonte: Dados de pesquisa

* Valores em US\$

O resultado retrata uma economia de cerca de US\$ 70.000,00 por ano quando se colhem as glebas propostas pelo sistema, conforme comparativo na Tabela 9.

Os procedimentos para planejamento bianual podem ser repetidos para intervalos de tempo menores ou maiores, seguindo-se a mesma lógica do modelo, bastando para isso fazer os ajustes nas repetições das glebas e no volume total por período. A partir dos dados das Tabelas 5 e 6, que são os resultados da interação das variáveis de decisão do modelo proposto, o planejador poderá fazer o detalhamento mensal das glebas que serão colhidas, elaborando o cronograma de colheita anual da empresa.

Uma grande vantagem da utilização de modelos de apoio ao planejamento é a velocidade de reação a mudanças no plano inicial. Para diferentes situações de mudança, basta fazer os ajustes corretos e uma nova seleção de glebas será proposta como solução. Os ajustes podem ser observados na Tabela 10.

TABELA 10 - Ajustes ao modelo APCF 1 em situações de mudança de cenário.

| Cenário | Ajuste |
|--|--|
| 1. Aumento no volume de madeira demandado | 1. Aumento no volume total mínimo fazendo com que a seleção alcance o volume demandado |
| 2. Aumento no rendimento da máquina | 2. Ajuste na capacidade de campo e no coeficiente de custo de corte C_{ij} |
| 3. Aumento no preço do combustível ou mão-de-obra. | 3. Ajuste no custo hora do trator florestal e, conseqüentemente, no coeficiente de custo de corte C_{ij} |

Em uma empresa florestal com madeira destinada à produção de carvão, podem haver mudanças na demanda de carvão em função de mudanças no mercado de aço. Portanto, se o plano de colheita anual precisar ser refeito, alterando-se o volume total (VT) tem-se uma nova seleção de glebas a serem colhidas como solução ótima. Qualquer variação nos dados de entrada do sistema podem ser ajustadas de forma instantânea e seu resultado poderá ser observado com bastante velocidade. Esta característica possibilita a elaboração de simulações para avaliação do impacto de mudanças.

5 CONCLUSÕES

O modelo de decisão no planejamento da colheita florestal APCF 1 foi preparado de forma a atender às necessidades de flexibilização decorrentes de possíveis mudanças de cenário do planejamento florestal, sendo aplicável em empresas florestais que utilizam outros sistemas de colheita, ou ainda aquelas que destinam madeira para a produção de celulose, podendo trazer reduções de custos preciosas em um momento de economia globalizada e competitividade crescente.

O aumento do custo de corte por hectare em áreas com maiores níveis de produtividade não excluiu estas glebas da solução ótima. Isto se verificou porque em glebas com maiores produtividades, o volume de madeira cortado por hora (produtividade da máquina) aumentou e, em conseqüência, consequentemente o custo de corte por estéreo de madeira se reduziu.

Os níveis de produtividade de floresta recomendados para corte pelo modelo APCF 1 estão acima de 150 st/ha, enquanto que os parâmetros utilizados na elaboração do plano de colheita da empresa estudada estavam em níveis de custos elevados, recomendando a colheita em florestas com produtividades a partir de 100 st/ha. Isto indica que o modelo ajustado tem também a função de identificar novos parâmetros em condições nas quais se utilizavam métodos empíricos na definição de critérios de decisão, facilitando a compreensão dos níveis ideais de produtividade da floresta a serem cortadas.

No modelo deste estudo, o principal fator decisivo na seleção das glebas foi a produtividade, gerando um impacto direto no custo de corte. Foi identificada a oportunidade de se testar a introdução do custo de exaustão e do custo de carbonização nas variáveis de decisão, completando-se portanto o ciclo produtivo desde a formação das mudas até a transformação da madeira em carvão.

As simulações de alocação do trator florestal *feller-buncher* no ano 1 e no ano 2 demonstraram a possibilidade de utilização do modelo em diferentes intervalos de tempo. Para isso, é necessária a subdivisão das variáveis de decisão em intervalos de tempo menores, aumentando portanto o número de variáveis do modelo de acordo com a necessidade de monitoramento de menores intervalos.

Atualmente, as empresas florestais vêm investindo em ferramentas de tecnologia de informação modernas como o GIS (Geographic Information System) e o GPS (Geographic Position System), para o mapeamento e gerenciamento de informações. Portanto, a oportunidade de construir uma única ferramenta que agregasse a precisão do GPS e a versatilidade do GIS como fornecedores de informações ao modelo desenvolvido neste trabalho, poderá facilitar a interface entre as áreas de mapeamento e planejamento, além de agilizar a entrada de dados que seria efetuada em apenas uma base. Esta ferramenta única poderá trazer ainda mais agilidade e precisão na tomada de decisão do planejador florestal, além dos ganhos inerentes à inevitável sinergia entre as áreas de inventário e planejamento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANUÁRIO Estatístico do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 1995, v. 55, cap. 6, p. 103-124.
- CHICHORRO, J. F.; REZENDE, J. L. P.; CECON, P. R. et al.** Efeito do fertilizante na produtividade e economicidade do *Eucalyptus grandis*. no município de Martinho Campos-MG. *Revista Árvore*, Viçosa, v.18, n.1, p.22-32, jan./abr.1994.
- CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V. et al.** **Timber management: a quantitative approach.** New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.
- CONWAY, S.** **Logging practices: principles of timber harvesting systems.** São Francisco: Miller Freeman, 1976. 416p.
- DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N.** **Forest Management.** New York: McGraw-Hill, 1987. 790 p.
- JONES, J. G.; MENEGHIN, B. J.; KIRBY, M. W.** Formulating adjacency constraints in linear optimization models for scheduling projects in tactical planning. *Forest Science*, v. 37, n. 5, p. 1283-1297, november 1991.
- MACHADO, C.C.** **Planejamento e controle de custos na exploração florestal.** Viçosa: UFV, 1994. 138p.
- MIALHE, L. J.** **Manual de mecanização agrícola.** São Paulo: Ceres, 1974. 301p.
- NELSON, J.; BRODIE, J.D.; SESSIONS, J.** Integrating short-term, area-base logging plans with long-term harvest schedules. *Forest Science*, v.37, n.1, p.101-122, march 1991.
- REIS, R. P.** **Introdução à teoria econômica.** Lavras: ESAL/FAEPE, 1997. 86p.

- SOFFNER, R. K.; MILAN, M.; RÍPOLI, T. C. C. Gerenciamento global de sistema agrícola em unidades sucroalcooleiras através de programação linear. **Stab - Açúcar, álcool e subprodutos**, Piracicaba, v.11, n.5, p.16-21, maio/jun. 1993.
- TANAKA, O. K. Exploração e transporte da cultura do eucalipto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.141, p.24-30, set. 1986.
- VALVERDE, S. R.; MACHADO, C.C.; REZENDE, J. L. P. et al. Análise técnica e econômica do arraste com skidder no sistema de colheita de árvores inteiras de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.20, n.1, p.101-109, jan. 1996.
- VALVERDE, S. R.; MACHADO, C.C.; SOUZA, A. P. et al. Análise técnica e econômica do corte de madeira com o trator florestal derrubador-amontoador (feller-buncher) no sistema de colheita florestal de árvores inteiras de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.20, n.2, p.229-240, abr. 1996.
- WARE, G. O.; CLUTTER, J. L. A mathematical programming system for the management of industrial forests. **Forest Science**, Bethesda, v.17, n.2, p. 428-445, Dec. 1971.

ANEXOS

ANEXO A

Página

| | | |
|-----------|--|----|
| TABELA 1A | Glebas disponíveis para corte nos anos 1 e 2 e respectivos volumes de madeira por hectare..... | 37 |
|-----------|--|----|

TABELA 1A - Glebas disponíveis para corte nos anos 1 e 2 e respectivos volumes de madeira por hectare.

| Gleba nº | Área | Produtividade | Gleba nº | Área | Produtividade |
|----------|------|---------------|----------|------|---------------|
| 1 | 32 | 54 | 31 | 36 | 149 |
| 2 | 45 | 61 | 32 | 41 | 154 |
| 3 | 27 | 65 | 33 | 19 | 159 |
| 4 | 10 | 71 | 34 | 25 | 162 |
| 5 | 4 | 74 | 35 | 49 | 165 |
| 6 | 28 | 81 | 36 | 17 | 172 |
| 7 | 23 | 85 | 37 | 5 | 172 |
| 8 | 6 | 88 | 38 | 15 | 173 |
| 9 | 32 | 88 | 39 | 27 | 174 |
| 10 | 37 | 90 | 40 | 13 | 175 |
| 11 | 33 | 94 | 41 | 41 | 179 |
| 12 | 33 | 95 | 42 | 14 | 186 |
| 13 | 9 | 99 | 43 | 11 | 194 |
| 14 | 13 | 101 | 44 | 16 | 205 |
| 15 | 21 | 104 | 45 | 42 | 209 |
| 16 | 26 | 106 | 46 | 10 | 219 |
| 17 | 34 | 107 | 47 | 27 | 234 |
| 18 | 37 | 108 | 48 | 27 | 256 |
| 19 | 8 | 109 | 49 | 22 | 269 |
| 20 | 27 | 113 | 50 | 34 | 273 |
| 21 | 33 | 118 | 51 | 6 | 279 |
| 22 | 24 | 120 | 52 | 19 | 296 |
| 23 | 28 | 127 | 53 | 46 | 210 |
| 24 | 41 | 128 | 54 | 49 | 142 |
| 25 | 30 | 134 | 55 | 32 | 95 |
| 26 | 22 | 137 | 56 | 37 | 162 |
| 27 | 33 | 146 | 57 | 32 | 176 |
| 28 | 31 | 147 | 58 | 35 | 229 |
| 29 | 37 | 147 | 59 | 31 | 138 |
| 30 | 24 | 148 | 60 | 28 | 199 |

...continua...

TABELA 1A, Cont.

| Gleba nº | Área | Produtividade | Gleba nº | Área | Produtividade |
|----------|------|---------------|----------|------|---------------|
| 61 | 24 | 191 | 91 | 48 | 63 |
| 62 | 11 | 220 | 92 | 15 | 88 |
| 63 | 37 | 200 | 93 | 15 | 90 |
| 64 | 32 | 152 | 94 | 48 | 131 |
| 65 | 15 | 169 | 95 | 48 | 106 |
| 66 | 3 | 216 | 96 | 27 | 114 |
| 67 | 4 | 280 | 97 | 17 | 125 |
| 68 | 24 | 156 | 98 | 37 | 107 |
| 69 | 13 | 229 | 99 | 2 | 103 |
| 70 | 36 | 317 | 100 | 5 | 101 |
| 71 | 8 | 328 | 101 | 26 | 72 |
| 72 | 9 | 256 | 102 | 22 | 101 |
| 73 | 6 | 195 | 103 | 24 | 65 |
| 74 | 8 | 148 | 104 | 23 | 117 |
| 75 | 7 | 131 | 105 | 24 | 65 |
| 76 | 8 | 238 | 106 | 27 | 83 |
| 77 | 20 | 351 | 107 | 33 | 77 |
| 78 | 23 | 231 | 108 | 20 | 51 |
| 79 | 33 | 127 | 109 | 37 | 103 |
| 80 | 15 | 365 | 110 | 48 | 66 |
| 81 | 15 | 242 | 111 | 48 | 88 |
| 82 | 8 | 298 | 112 | 48 | 82 |
| 83 | 34 | 273 | 113 | 46 | 130 |
| 84 | 25 | 254 | 114 | 48 | 64 |
| 85 | 26 | 234 | 115 | 48 | 80 |
| 86 | 20 | 250 | 116 | 39 | 121 |
| 87 | 24 | 304 | 117 | 43 | 131 |
| 88 | 11 | 213 | 118 | 41 | 133 |
| 89 | 24 | 95 | 119 | 29 | 136 |
| 90 | 48 | 56 | 120 | 25 | 140 |

...continua...

TABELA 1A, Cont.

| Gleba nº | Área | Produtividade | Gleba nº | Área | Produtividade |
|----------|------|---------------|----------|------|---------------|
| 121 | 26 | 150 | 151 | 37 | 212 |
| 122 | 37 | 213 | 152 | 40 | 128 |
| 123 | 23 | 221 | 153 | 36 | 218 |
| 124 | 24 | 228 | 154 | 39 | 220 |
| 125 | 39 | 85 | 155 | 34 | 192 |
| 126 | 37 | 205 | 156 | 23 | 125 |
| 127 | 22 | 128 | 157 | 23 | 52 |
| 128 | 39 | 200 | 158 | 21 | 76 |
| 129 | 38 | 174 | 159 | 37 | 78 |
| 130 | 3 | 142 | 160 | 28 | 59 |
| 131 | 38 | 163 | 161 | 39 | 81 |
| 132 | 34 | 169 | 162 | 46 | 98 |
| 133 | 38 | 173 | 163 | 48 | 100 |
| 134 | 38 | 101 | 164 | 37 | 161 |
| 135 | 38 | 102 | 165 | 34 | 170 |
| 136 | 39 | 157 | 166 | 49 | 66 |
| 137 | 37 | 142 | 167 | 41 | 99 |
| 138 | 38 | 156 | 168 | 49 | 54 |
| 139 | 29 | 213 | 169 | 49 | 63 |
| 140 | 39 | 196 | 170 | 47 | 69 |
| 141 | 27 | 157 | 171 | 45 | 72 |
| 142 | 38 | 163 | 172 | 69 | 91 |
| 143 | 40 | 116 | 173 | 49 | 75 |
| 144 | 26 | 210 | 174 | 46 | 108 |
| 145 | 37 | 150 | 175 | 25 | 148 |
| 146 | 36 | 150 | 176 | 30 | 131 |
| 147 | 11 | 134 | 177 | 18 | 234 |
| 148 | 38 | 209 | 178 | 29 | 138 |
| 149 | 36 | 137 | 179 | 20 | 236 |
| 150 | 25 | 280 | 180 | 24 | 235 |

...continua...

TABELA 1A, Cont.

| Gleba nº | Área | Produtividade | Gleba nº | Área | Produtividade |
|----------|------|---------------|----------|------|---------------|
| 181 | 18 | 150 | 193 | 25 | 113 |
| 182 | 13 | 161 | 194 | 25 | 185 |
| 183 | 24 | 199 | 195 | 25 | 227 |
| 184 | 18 | 208 | 196 | 27 | 132 |
| 185 | 26 | 211 | 197 | 39 | 81 |
| 186 | 49 | 68 | 198 | 16 | 124 |
| 187 | 50 | 77 | 199 | 24 | 131 |
| 188 | 50 | 79 | 200 | 24 | 115 |
| 189 | 45 | 89 | 201 | 24 | 222 |
| 190 | 50 | 93 | 202 | 24 | 204 |
| 190 | 48 | 61 | 203 | 22 | 60 |
| 192 | 25 | 168 | 204 | 50 | 60 |

Fonte: Mannesmann Florestal