

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS  
ESALQ/USP  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS

SÉRIE TÉCNICA  
ISSN – 0100-8137

**GERENCIAMENTO DE FLORESTAS DE *Eucalyptus* COM MODELOS DE  
PROGRAMAÇÃO LINEAR**

RODRIGUES, L.C.E.  
MOREIRA, R.M.

Sér. Téc. - IPEF	Piracicaba	v.6	n.19	p. 1 – 15	Mai. 1989
------------------	------------	-----	------	-----------	-----------

**IPEF** Série Técnica é publicado trimestralmente pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais em convênio com a Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Ciências Florestais.

**IPEF** Série Técnica publica todas as contribuições originais que, analisadas pelo Conselho Editorial, se enquadram como *anais de encontros* ou *monografias*, com o objetivo de atualizar o conhecimento sobre temas florestais de grande interesse prático.

Comitê Editorial

Luiz E. G. Barrichelo  
ESALQ, USP

Walter de Paula Lima  
ESALQ, USP

Marialice M. Poggiani  
IPEF

Admir Lopes Mora  
IPEF

Endereço

IPEF – Biblioteca – ESALQ/USP  
Caixa Postal 530  
13400 – Piracicaba, SP – Brasil  
TELEX 19 7881 IPEF BR

---

# GERENCIAMENTO DE FLORESTA DE *Eucalyptus* COM MODELOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

---

RODRIGUES, L.C.E.<sup>1</sup>  
MOREIRA, R.M.<sup>2</sup>

## 1. INTRODUÇÃO

Ao se elaborar um programa de gerenciamento florestal são muitas as variáveis e informações que devem ser consideradas. São inúmeras as estratégias de ação disponíveis e diversos os seus resultados. A capacidade de síntese do planejador ou do método por ele usado, não necessariamente deve diminuir a complexidade dos problemas, mas sim organizar a forma de resolvê-los.

Neste sentido a programação linear vem despertando a atenção dos técnicos das áreas de Economia e Planejamento Florestal. Usada como instrumento auxiliar de tomada de decisões no gerenciamento florestal, é principalmente útil na definição de quando, quanto e onde cortar; onde, quando e quanto reformar e que regime de manejo adotar em cada talhão respeitando restrições operacionais e de recursos da empresa e, ao mesmo tempo, maximizando os retornos sobre os investimentos realizados. Para um real aproveitamento da metodologia apresentada neste trabalho é ideal que o leitor desenvolva alguma familiaridade com problemas de programação linear. DAVIS & JOHNSON (1987), CLUTTER (1983), LEUSCHENER (1984) e DYKSTRA e WARE & CLUTTER (1971). Uma aplicação de programação linear no gerenciamento de *Eucalyptus* é apresentada por RODRIGUEZ *et alii* (1986).

Este trabalho descreve um modelo de programação linear voltado para a otimização do gerenciamento de florestas de *Eucalyptus*. O modelo é inicialmente apresentado de forma conceitual e depois aplicado em um estudo de caso que, apesar de apresentar reduzida complexidade, ilustra, em menor escala, situações bastante reais. O principal objetivo deste trabalho é preparar um roteiro que permita o desenvolvimento de modelos simples na sua concepção, mas poderosos se utilizados com criatividade e ponderação.

## 2. MODELO TEÓRICO

### 2.1. Principais Conceitos

A seguir definem-se alguns conceitos utilizados na apresentação da metodologia:

*Rotação*: compreende o período de tempo decorrido entre o crescimento inicial de muda, ou da brotação, e o corte raso de uma floresta de *Eucalyptus*.

*Ciclo Florestal*: definido como o período de tempo decorrido entre o plantio da muda e o corte raso final da floresta de *Eucalyptus*, pode compreender uma ou mais rotações.

---

<sup>1</sup> Departamento de Ciências Florestais – ESALQ/USP, Caixa Postal 9. 13400 – Piracicaba, SP

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, Caixa Postal 530. 13400 – Piracicaba, SP

*Talhão Florestal*: resultado da subdivisão em pequenas áreas de uma floresta implantada e voltada para o suprimento industrial, com localização e dimensões bem definidas e, em geral, permanente.

*Estrato Florestal*: conjunto de talhões florestais, cuja constituição arbórea, idade e localização topográfica permitem diferenciá-lo dos demais.

*Horizonte de Planejamento*: corresponde ao período de tempo ao longo do qual serão considerados certos objetivos e restrições. Deve ser suficientemente longo para suportar 1,5 a 2 ciclos de uma floresta de *Eucalyptus*.

*Regime de Manejo*: corresponde ao conjunto de práticas silviculturais necessárias para implementar a repetição de um mesmo ciclo florestal ao longo do horizonte de planejamento. Considerando apenas a possibilidade de corte em diferentes idades, a Tabela 1 apresenta alguns regimes de manejo alternativos para condução de uma floresta de *Eucalyptus*, em primeira rotação, com 4 anos de idade no ano zero de planejamento através de ciclos de duas rotações. Os números entre parênteses representam a idade de corte na primeira e segunda rotações. Desta forma o regime 5 x 7 estabelece um corte aos 5 anos de idade na primeira rotação e um corte aos 7 anos na segunda rotação.

**Tabela 1:** Regimes alternativos de manejo de *Eucalyptus*

Regimes de Manejo	Horizonte de Planejamento (anos)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 (5 x 5)	CC					CR					CC
2 (6 x 5)		CC					CR				
3 (6 x 6)		CC						CR			
4 (5 x 7)	CC							CR			
5 (7 x 6)			CC						CR		

CC = Corte raso e condução de rebrota

CR = Corte raso e reforma

Quando da definição dos regimes de manejo, todas as estratégias possíveis de condução do estrato florestal devem ser consideradas. Isto implica no conhecimento prévio dos custos e exigências técnicas de cada regime de manejo, assim como terão que ser prognosticadas as prováveis produções de cada estrato florestal em cada regime de manejo implementado.

## 2.2. Avaliação Econômica

Todos os ciclos disponíveis para condução de um determinado estrato florestal podem ser hierarquizados através de um critério exclusivamente financeiros. O critério de avaliação mais recomendado para determinação do ciclo ótimo é o Valor Esperado da Terra<sup>1</sup> (VET). Denominaremos ciclo economicamente ótimo ao ciclo de maior VET.

Assim como os ciclos, alguns regimes de manejo apresentam resultados financeiros mais favoráveis do que outros. Usaremos essas diferenças como critério de seleção dos

<sup>1</sup> Quanto à superioridade deste método, como critério de determinação da idade ótima de corte, ver NEWMAN, D.H. (1988)

regimes que, obedecidas as restrições impostas, mais contribuirão para a otimização do resultado econômico do empreendimento florestal.

Para cada regime de manejo em cada unidade, as receitas brutas dos cortes juntamente com os custos de implantação, condução, manutenção, exploração e transporte, permitem a obtenção de um fluxo de caixa completo.

A preferência por um determinado regime de manejo pode ser avaliada através da análise do valor líquido presente do respectivo fluxo de caixa, desde que o método de cálculo do valor presente permita a posterior comparação dos valores obtidos para cada regime.

A necessidade de se utilizar um critério de avaliação que permita esta comparação sugere a utilização de fluxos de caixa perpétuos constituídos inicialmente pelo horizonte de planejamento, dentro do qual são considerados os ciclos definidos pelo regime de manejo, e posteriormente pela repetição infinita do ciclo economicamente ótimo para esse estrato.

Ao valor líquido presente desse fluxo de caixa denominaremos valor presente do regime. A hierarquização dos regimes de acordo com o valor presente coloca aquele de mais alto valor como o primeiro da lista. Apesar de ótimo em termos de maturação financeira, este regime nem sempre é adotado, pois pode não recomendar o corte da floresta em anos de real necessidade de produção de madeira, ou pode contribuir para a formação de um fluxo irregular de produção. Por contemplar apenas eficiência econômico-financeira, a escolha do regime de maior valor presente, para cada estrato, pode não estar levando em consideração outros objetivos e necessidades do planejador.

Neste trabalho, consideraremos que o principal objetivo do planejador é maximizar o valor presente global de um empreendimento florestal. A forma de se impor um fluxo regular de produção ao longo do horizonte de planejamento será apresentada mais adiante. A seguir explicitaremos o método de obtenção do ciclo economicamente ótimo para cada estrato e o método de cálculo do valor presente de cada regime de manejo.

### 2.2.1. Definição do Ciclo Economicamente Ótimo

O ciclo economicamente ótimo de cada estrato deve ser inicialmente determinado, pois o respectivo VET será posteriormente utilizado no cálculo do valor presente de cada regime de manejo. Estabelecidas uma idade mínima e máxima de corte e consideradas todas as combinações possíveis de duração de cada rotação, é fácil verificar o grande número de ciclos alternativos disponíveis para condução de uma floresta de *Eucalyptus*. Por exemplo, se fossem considerados apenas ciclos de 2 rotações e cinco diferentes idades de corte, teríamos definido 25 ciclos alternativos de manejo e, pelo critério do VET, apenas um destes ciclos seria considerado economicamente ótimo.

Um ciclo de 2 rotações de *Eucalyptus*, por exemplo, pode ser representado através do seguinte fluxo de caixa:

$$\begin{array}{lcl}
 (+) & & pVr & & pVn \\
 \text{Anos} & 0 & \_ 1 \_ 2 \_ \dots & \_ r \_ r+1 \_ \dots & \_ [n] \\
 (-) & I & m_1 \ m_2 & m_r + eV_r \ m_{r+1} & m_n + eV_n
 \end{array}$$



onde,

$r$  = ano em que ocorre o primeiro corte;

e = custo de exploração por unidade de volume ou peso.

$$RLT_k = (p - e) V_r (1 + i)^{(n-r)} + (p - e) V_n - I (1 + i)^n - \sum_{t=1}^n m_t (1 + i)^{t-t}$$
$$\text{VET}_k = \frac{\text{RLT}_k}{[(1+i)^n - 1]}$$

0 — [4] — 10 — [15] — 21 — [26] —  $CE_{\infty}$

Handwritten annotations:

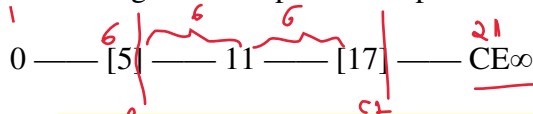
- Red numbers 5, 6, 5, 4, 6, 5 are written below the intervals.
- A red bracket groups the intervals [15] to [26] with the number 6 written below it.
- A red arrow points to the interval [26].
- A red inequality  $6 > 5$  is written to the right of the diagram.

$$VET + R_{2c} \quad 2$$

$$R_{0-20} + VET^*$$

onde  $CE_{\infty}$  representa a infinita repetição do ciclo economicamente ótimo.

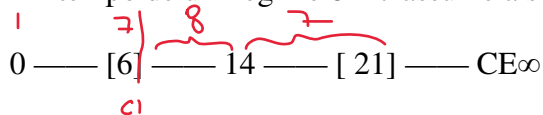
2. Se o intervalo de tempo entre o corte da última rotação do regime e o final do período de planejamento não permite uma primeira rotação do ciclo economicamente ótimo, encerra-se o fluxo de caixa no ano de corte da última rotação do ciclo em questão e encerra-se o fluxo de caixa no ano de corte da última rotação do ciclo em questão e soma-se o VET do ciclo economicamente ótimo à receita obtida com esse último corte. Assim sendo, a linha de tempo de um regime 6 x 6 pode ser representada da seguinte forma:



$$R_{0-17} + VET^*$$

Handwritten note:  $4 < 5$

3. Se o último corte do regime ocorre exatamente no último ano do horizonte de planejamento, encerra-se o fluxo de caixa nesse ano e soma-se VET do ciclo economicamente ótimo à receita obtida com esse corte. Neste caso a linha de tempo de um regime 8 x 7 assume a seguinte representação:



$$21 = 21 \quad VET^* + R_{0-21}$$

Considerando a terminologia adotada, podemos estabelecer uma fórmula geral para o cálculo do valor presente de cada regime  $k$  ( $P_k$ ):

$$P_k = \sum_{t=0}^{\hat{n}} \left( \frac{(p - e) V_t - I_t - m_t}{(1+i)^t} \right) + \frac{VET^*}{(1+i)^{\hat{n}}}$$

onde,

$\hat{n}$  = ano em que ocorre o último corte do regime  $k$  (considerando as regras já definidas)

### 2.3. Modelo Matemático

Os modelos de programação linear desenvolvidos para otimizar o gerenciamento florestal foram classificados por JOHNSON & SCHEURMAN em modelos do tipo I e do tipo II. Devido à sua maior simplicidade, o modelo tipo I tem sido mais intensamente difundido e utilizado. O modelo descrito neste trabalho caracteriza-se como sendo do tipo I.

Apresentamos a seguir a terminologia que será utilizada para definir matematicamente cada expressão do modelo.

$n$  = número de anos do horizonte de planejamento.

$N$  = Número de estratos florestais.

$M$  = Número de regimes de manejo.

$L$  = Número de sortimentos (madeira para polpa, energia, serraria etc.)

$A_i$  = Área total em hectares, do estrato florestal  $i$ .

$X_{ik}$  = Número de hectares do estrato florestal  $i$  designados ao regime de manejo  $k$ .

$P_{ik}$  = Valor presente, por hectare, do estrato florestal  $i$  caso o regime de manejo  $k$  seja implantado.

$V_{ijkl}$  = Volume ou peso, por hectare, do sortimento  $l$  a ser explorado no estrato florestal  $i$ , no ano  $j$ , caso o regime de manejo  $k$  seja implantado.

$D_{ijk}$  = Entrada (+) ou saída (-) de caixa no ano  $j$  do estrato florestal  $i$  caso o regime de manejo  $k$  seja implantado.

A consideração de que o principal objetivo do planejador é maximizar o valor presente global do empreendimento florestal permite a definição da seguinte função objetivo:

$$Z = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M P_{ik} X_{ik}$$

onde  $Z$  representa o valor líquido presente do fluxo de caixa global resultante do gerenciamento futuro de todos os estratos da floresta.

O conjunto de restrições pode impor valores máximos e mínimos anuais de área reformada, volume explorado, e da caixa disponível. O conjunto de restrições pode também forçar ou não a exploração integral da área de cada estrato florestal. Esta última restrição será denominada disponibilidade total de área de cada estrato florestal. A seguir será apresentada a definição matemática de cada uma dessas restrições.

*Disponibilidade total de área de cada estrato florestal:* estas são restrições imprescindíveis no modelo, pois explicitam a área total disponível de cada estrato da floresta e impõe que a soma das áreas de um mesmo estrato submetidas a regimes diferentes seja igual à área total do estrato.

$$\sum_{k=1}^M X_{ik} = A_i$$

*Imposição de cotas anuais de produção:* este conjunto de restrições é freqüentemente utilizado e talvez o mais importante. A sua função no modelo é impor os limites anuais mínimos e máximos de produção desejada.

$$\text{Limite inferior} \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M V_{ijkl} X_{ik} \geq V \text{ MIN}_{jl} \begin{cases} (j=1,2,\dots,n) \\ (l=1,2,\dots,L) \end{cases}$$

$$\text{Limite superior} \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M V_{ijkl} X_{ik} \leq V \text{ MAX}_{jl} \begin{cases} (j=1,2,\dots,n) \\ (l=1,2,\dots,L) \end{cases}$$

onde,

$V \text{ MIN}_{jl}$  = volume mínimo exigido, do sortimento  $l$ , para suprir a indústria no ano  $j$ .

$V \text{ MAX}_{jl}$  = volume máximo desejado, do sortimento  $l$ , para suprir a indústria no ano  $j$ .



*Restrições operacionais:* este conjunto de restrições é opcional e normalmente usado para expressar a capacidade máxima e mínima de ação das equipes de corte ou plantio. Se houver necessidade de impor limitações operacionais de corte, e a capacidade anual de plantio também for limitada, um conjunto de restrições deverá representar as limitações anuais de corte e outro as limitações anuais de área plantada.

$$\text{Limite inferior} \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \alpha_{ijk} X_{ik} \geq E \text{ MIN}_j (j=1,2,\dots,n)$$

$$\text{Limite superior} \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \alpha_{ijk} X_{ik} \leq E \text{ MAX}_j (j=1,2,\dots,n)$$

onde,

$\alpha_{ijk} = 1$ , se no ano  $j$  o regime  $k$  determinar o corte (ou plantio) do estrato  $i$ .

$\alpha_{ijk} = 0$ , se no ano  $j$  o regime  $k$  não determinar o corte (ou plantio) do estrato  $i$ .

$E \text{ MIN}_j$  = área mínima em hectares que deve ser cortada (ou plantada) no ano  $j$ .

$E \text{ MAX}_j$  = área máxima em hectares capaz de ser cortada (ou plantada) no ano  $j$ .

*Disponibilidade de caixa no ano  $j$ :* nas situações em que a dotação orçamentária é pouco flexível, estas restrições permitem impor limitações orçamentárias anuais.

$$\text{Limite inferior} \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M D_{ijk} X_{ik} \geq D \text{ MIN}_j (j=1,2,\dots,n)$$

$$\text{Limite superior} \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M D_{ijk} X_{ik} \leq D \text{ MAX}_j (j=1,2,\dots,n)$$

onde,

$D \text{ MIN}_j$  = caixa mínimo disponível no ano  $j$ .

$D \text{ MAX}_j$  = caixa máximo disponível no ano  $j$ .

Um problema real, para ser resolvido, exige a utilização de programas de computadores especializados na solução de problemas de programação linear. Dependendo da dimensão do problema será necessário um computador de grande porte ou um microcomputador. Entre os programas mais recomendados destacam-se:

*LP88* – específico para solução de problemas de programação linear em microcomputadores.

Eastern Software Products, Inc. P.O. Box 15328, Alexandria, Virginia 72309.

*MPSX* – Mathematical Programming System Extended, para computadores IBM de grande porte.

*TEMPO* – Mathematical Programming System, para computadores UNISYS (BURROUGHS) de grande porte.

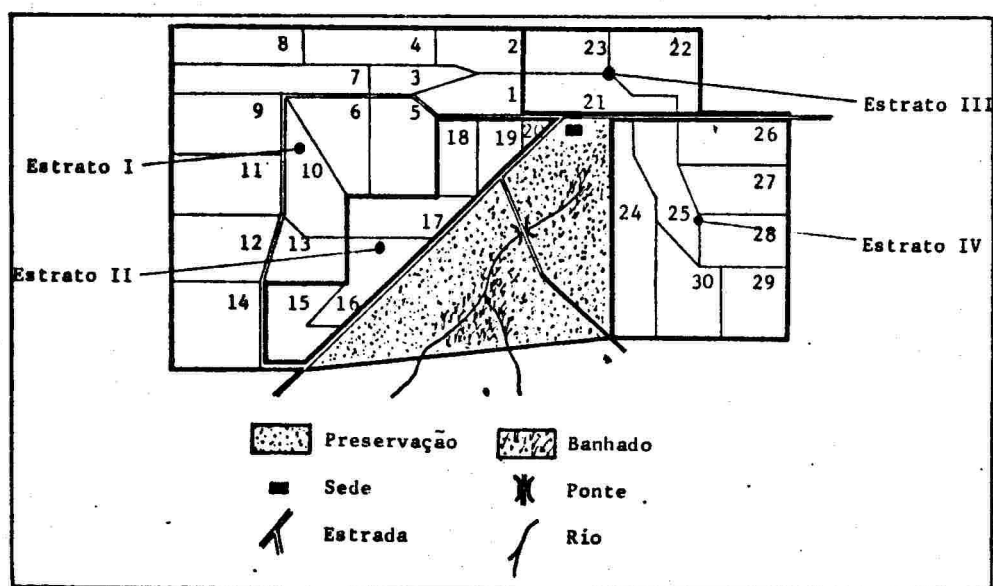
### 3. ESTUDO DE CASO

#### 3.1. Descrição do Caso

A Fazenda Modelo pertence a uma grande indústria de setor de papel e celulose. De uma área total de 740 ha, possui 505 ha totalmente reflorestados com três espécies de *Eucalyptus*.

A Figura 1 apresenta um croqui da fazenda, com o talhonamento e os estratos atualmente considerados pela equipe de planejamento. A área de cada talhão é apresentada na Tabela 2.

Espera-se que a fazenda produza, no mínimo, 10.000 m<sup>3</sup> ssc de madeira por ano. Apresentam-se, a seguir, todos os passos implementados pela equipe para encontrar um regime global de manejo da fazenda, que não só atenda à exigência de produção estipulada, mas que também maximize o resultado econômico de sua exploração.



**Figura 1:** Croqui da Fazenda Modelo

**Tabela 2:** Área dos talhões e dos estratos

Talhões	Área	Talhões	Área	Talhões	Área
Estrato I		Estrato II		Estrato IV	
1	12.20	15	18.0	24	28.00
2	11.70	16	15.70	25	17.50
3	8.50	17	15.70	26	18.00
4	15.00	18	13.00	27	17.00
5	22.50	19	9.40	28	15.00
6	19.00	20	3.20	29	15.00
7	19.70	Total	75.00	30	19.50
8	15.00	Estrato III		Total	130.00
9	23.50				
10	20.40				
11	23.50				
12	21.50	21	18.00		
13	12.50	22	19.50		
14	25.00	23	12.50		
Total	250.000	Total	50.00		

### 3.2. Definição dos regimes de manejo

Os estratos I, II e III encontram-se em segunda rotação e serão reformados após o corte. Quando da primeira reforma do Estrato I, o modelo deverá optar por idades de corte entre 5 e 8 anos. O modelo de otimização matemática deverá indicar a idade adequada de reforma de cada estrato. Apenas para o estrato I as idades de corte diferem entre a espécie atual e a espécie após a reforma. A composição desses estratos, assim como as respectivas idades de corte e produções esperadas são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Composição e produtividade dos estratos I, II e III

										Produtividade (m³ ssc)								
										atual			após			reforma		
Estrato	Solo/Fértil.	Área (ha)	Espécie	Idade (anos)	Rotação	5	6	7	8	1ª rot.			2ª rot.					
										5	6	7	5	6	7			
I	AQ/baixa	250	E. gr.	2	2ª	70	76	70	80	123	138	-	102	125	-			
II	LVA/média	75	E. sal.	5	2ª	-	135	158	-	-	176	198	-	166	192			
III	LVA/baixa	50	E. sal.	1	2ª	97	108	-	-	135	161	-	121	152	-			

AQ = areia quartzosa

LVA = Latossolo Vermelho Amarelo

O estrato IV está em primeira rotação e seu atual nível de produtividade dificilmente poderá ser aumentado. Sendo assim este será conduzido mantendo-se a atual capacidade produtiva do solo. A Tabela 4, apresenta a composição e a capacidade produtiva deste estrato.

**Tabela 4:** Composição e produtividade do estrato IV

Estrato	Solo/Fertil.	Área (ha)	Espécie	Idade (anos)	Rotação	Produtividade (m <sup>3</sup> ssc)					
						1ª rot.			2ª rot.		
						5	6	7	5	6	7
IV	LVE/alta	130	E. ur.	4	1ª	168	193	228	151	181	223

LVE = Latossolo Vermelho Escuro'

Optou-se por um horizonte de planejamento de 21 anos, pois, assumindo que o *Eucalyptus* é tipicamente conduzido através de ciclos de duas rotações de 7 anos, seguiu-se a recomendação de dimensionar o horizonte em 1,5 vezes o ciclo típico da floresta (CLUTTER, 1983).

A Tabela 5, apresenta os diferentes regimes de manejo disponíveis para cada estrato e respectivas produções esperadas dentro do horizonte de planejamento de 21 anos. As produções esperadas foram obtidas a partir dos dados apresentados nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 5:** Regimes de manejo dos estratos da Fazenda Modelo

Horizonte de Planejamento																						
Regime	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Estrato I																						
5 x 5				[70]					123					[102					123			
6 x 5					[76]						138					[102]						138
5 x 6						[79]					123						[125]					123
6 x 6							[80]						138						[125]			
Estrato II																						
6 x 6		[135]						176						[166]						176		
7 x 6		[135]							198						[166]							198
6 x 7			[158]						176								[192]					176
7 x 7			[158]							198								[192]				
Estrato III																						
5 x 5					[97]					135					[121]					135		
6 x 5					[97]						161						[121]					161
6 x 7						[108]					135							[152]				135
6 x 6						[108]						161							[152]			
Estrato IV																						
5 x 5	168						[151]					168					[151]					168
6 x 5			193					[151]						193					[151]			
7 x 5				228					[151]							228					[151]	
5 x 6	168								[181]				168						[181]			
6 x 6			193							[181]					193						[181]	
7 x 6				228							[181]						228					
5 x 7	168									[223]				168							[223]	
6 x 7			193								[223]					193						
7 x 7				228								[223]						228				

### 3.3. Avaliação econômica dos regimes de manejo

Este item trata do cálculo dos coeficientes  $P_{ik}$  que representam o valor líquido presente (por há) do fluxo de caixa do regime  $k$  se conduzido no estrato  $i$ . Os cálculos consideram os seguintes dados:

Taxa de Juros ( $i$ ): 7%

Custo Fixo de Manutenção/ha ( $m_f$ ): US\$ 3,60

Custo de Reforma/há ( $I$ ): US\$ 80,00

Custo de exploração/ $m^3$ ssc (e): US\$ 1,00

Preço de venda da madeira/ $m^3$ ssc (p): US\$ 1,95

A Tabela 6 apresenta os VET's dos possíveis ciclos de cada estrato. Considerando o mais alto VET de cada estrato ( $VET_i^*$ ) definem-se como ciclos economicamente ótimos o 5 x 6 para o estrato I; 6 x 7 para o estrato II; 6 x 6 para o estrato III; e 5 x 7 para o estrato IV.

$RL = VPL \{1+i\}^T \rightarrow$  *o último custo*

**Tabela 6:** Valor Esperado da Terra dos possíveis ciclos de cada estrato (VET<sub>i</sub>)

Ciclo	Estrato I	Estrato II	Estrato III	Estrato IV
5 x 5	55.50	-	90.70	165.63
6 x 5	50.29	-	94.37	158.75
7 x 5	-	-	-	161.85
5 x 6	62.36	-	101.06	168,58
6 x 6	56.64	131.01	103.31	161.74
7 x 6	-	123.91	-	164.35
5 x 7	-	-	-	178.53
6 x 7	-	131.64	-	170.92
7 x 7	-	124.79	-	172.44

Apenas o  $VET_i^*$  é utilizado no cálculo dos coeficientes  $P_{ik}$ . A cada  $P_{ik}$  corresponde um único fluxo de caixa, que termina quando da exploração do último corte de um ciclo completo previsto dentro do horizonte de planejamento. A essa última receita do fluxo de caixa de cada  $P_{ik}$  é somado o respectivo  $VET_i^*$ . O objetivo desse procedimento é, partindo-se da premissa que após o horizonte de planejamento cada estrato será perpetuamente conduzido através do ciclo economicamente ótimo, considerar o infinito como horizonte de tempo comum a todos os regimes alternativos incluídos no modelo. A seguir, dois exemplos apresentam os cálculos necessários.

**Cálculo do coeficiente**  $P_{4,1}$ : este caso envolve um regime de manejo onde a última exploração de um ciclo completo ocorre 5 anos após o último ano do horizonte de planejamento. Portanto:

$$P_{4,1} = \sum_{t=0}^{26} \frac{p \cdot V_t}{(1,0)^t} - \sum_{t=0}^{26} \frac{c \cdot V_t}{(1,07)^t} - \sum_{t=0}^{26} \frac{3,60}{(1,07)^t} - \frac{80,00}{(1,07)^6} - \frac{80,00}{(1,07)^{14}} + \frac{178,53}{(1,07)^{26}} = 336,57$$

Cálculo do coeficiente  $P_{3,4}$ : neste caso o fluxo de caixa pode ser encerrado no ano 17, pois a última exploração de um ciclo completo ocorre nesse ano.

$$P_{3,4} = \sum_{t=0}^{17} \frac{p \cdot V_t}{(1,07)^t} - \sum_{t=0}^{17} \frac{c \cdot V_t}{(1,07)^t} - \sum_{t=0}^{17} \frac{3,60}{(1,07)^t} - \frac{80,00}{(1,07)^5} + \frac{154,74}{(1,07)^{17}} = 128,45$$

A Tabela 7 apresenta os valores de cada  $P_{ik}$ .

**Tabela 7:** Valor Presente por estrato e regime de manejo

Regime	Estrato I	Estrato II	Estrato III	Estrato IV
5 x 5	87.99	-	126.18	336.57
6 x 5	79.73	-	128.04	331.19
7 x 5	-	-	-	333.71
5 x 6	79.61	-	127.21	341.71
6 x 6	69.32	235.45	128.45	333.60
7 x 6	-	229.94	-	335.88
5 x 7	-	-	-	351.27
6 x 7	-	235.97	-	343.01
7 x 7	-	232.32	-	344.48

### 3.4. Formulação do Problema

Este estudo de caso envolve apenas a imposição de uma cota de produção mínima anual constante de  $100.000 m^3_{ssc}$ . O problema, proposto desta forma, deve apresentar 25 restrições (linhas) – 4 utilizadas para indicar a disponibilidade de terra e 21 utilizadas para indicar a produção mínima de madeira exigida a cada ano – e 21 variáveis (colunas), que representam os regimes alternativos de manejo para a fazenda. O problema completo é apresentado na *Tabela 8*.

**Tabela 8:** Representação matricial do problema de programação linear

	X11	X12	X13	X14	X21	X22	X23	X24	X31	X32	X33	X34	X41	X42	X43	X44	X45	X46	X47	X48	X49	
F.O.	88	80	80	69	235	230	236	232	126	128	127	128	337	331	334	341	334	336	351	343	344	
T1	1	1	1	1																		= 250
T2					1	1	1	1														= 75
T3									1	1	1	1										= 130
T4													1	1	1	1	1	1	1	1	1	≥ 10.000
S1					135	135							168			168			168			≥ 10.000
S2							158	158						193			193			193		≥ 10.000
S3	70														228			228			228	≥ 10.000
S4		76							97	97												≥ 10.000
S5			79								108	108										≥ 10.000
S6				80									151									≥ 10.000
S7					176									151		181						≥ 10.000
S8	123					198	176								151		181		223			≥ 10.000
S9								198	135									181		223		≥ 10.000
S10		138	123							161	135										223	≥ 10.000
S11												161	168									≥ 10.000
S12				138												168						≥ 10.000
S13	102				166									193					168			≥ 10.000
S14						166			121								193					≥ 10.000
S15		102					192			121					228					193		≥ 10.000
S16			125					192			152		151					228				≥ 10.000
S17												152									228	≥ 10.000
S18	123			125										151		181						≥ 10.000
S19					176				135													≥ 10.000
S20															151		181		223			≥ 10.000
S21		138	123			198	176			161	135		168									≥ 10.000

(Os coeficientes da função objetivo foram arredondados para valores inteiros)



### 3.5. Processamento e Operacionalização dos Resultados

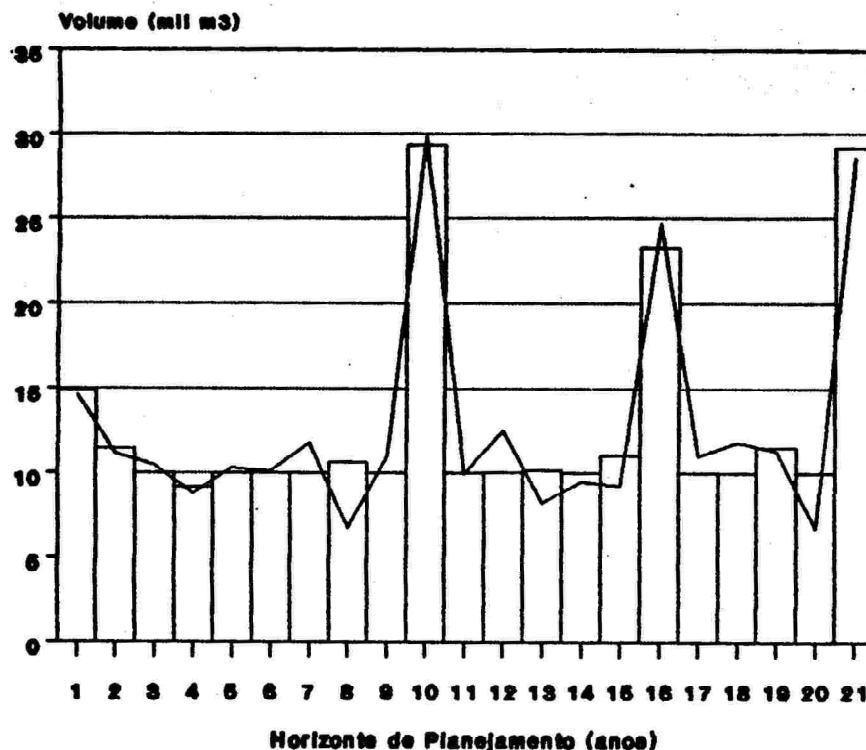
O problema foi resolvido em microcomputador através do programa **LP88**. A terceira coluna da *Tabela 9* e o gráfico da *Figura 2* mostram a solução e o fluxo esperado de produção. Foi necessário diminuir a exigência de produção no ano 4 pois o modelo matemático da forma como foi formulado, não encontraria solução para uma demanda constante de no mínimo  $10.000 m^3_{scc}$ . Nota-se a exatidão com que a imposição de produzir os limites mínimos foi atendida.

Trata-se, entretanto, de uma resposta não operacional pois implicaria na subdivisão de talhões que a princípio devem ser conservados inteiros. A solução deste problema implica na elaboração de um plano alternativo, o mais próximo possível da solução matemática, que melhor se ajuste às condições operacionais da empresa. A *Tabela 9* apresenta também uma solução alternativa, operacionalmente viável. A *Figura 2* permite comparar os fluxos de produção das duas soluções. Nota-se que o fluxo de produção de madeira do plano alternativo não é muito diferente da solução matemática. Cabe lembrar que, se fossem estipulados mais regimes alternativos de manejo em cada estrato, outra solução mais interessante poderia ter sido obtida.

A *Tabela 10* mostra a constituição dos sub-estratos que permitem a implementação do plano operacional proposto na *Tabela 9*. Tomando como base a solução operacional apresentada nas *Tabelas 9 e 10* e considerando as informações da *Tabela 5*, foi montado um relatório com o plano anual de manejo (Anexo A) que especifica para cada ano, os talhões que devem ser cortados por posterior condução de rebrota (CC) e os talhões que devem ser cortados e reformados (CR). Esse tipo de relatório, especificando as intervenções anuais, é o principal resultado e objetivo final da metodologia apresentada.

**Tabela 9:** Área explorada por estrato e regime

Estrato	Regime	Solução Matemática	Solução Operacional
I	5 x 5	5.22	-
	6 x 5	93.13	91.10
	5 x 6	88.14	88.90
	6 x 6	63.52	70.00
	6 x 6	48.76	49.40
II	7 x 6	-	-
	6 x 7	-	-
	7 x 7	26.24	25.60
	5 x 5	21.88	19.50
III	6 x 5	-	-
	5 x 6	-	-
	6 x 6	28.12	30.50
	5 x 5	32.57	30.00
	6 x 5	-	-
IV	7 x 5	6.92	-
	5 x 6	7.84	17.00
	6 x 6	38.10	37.00
	7 x 6	10.22	18.00
	5 x 7	9.23	-
	6 x 7	-	-
	7 x 7	25.11	28.00



**Figura 2:** Fluxos de produção da solução matemática e da solução operacional

**Tabela 10:** Constituição dos sub-estratos no plano operacional

Estrato	Sub-Estrato	Regime	Talhões	Área (ha)
I	A	5 x 6	1, 2, 3, 4, 5, 6	88.90
	B	6 x 5	7, 8, 9, 10, 13	91.10
	C	6 x 6	11, 12, 14	70.00
II	A	6 x 6	15, 16, 17	49,40
	B	7 x 7	18, 19, 20	25,60
III	A	5 x 5	22	19.50
	B	6 x 6	21, 23	30.50
	A	5 x 5	28, 29	30.00
IV	B	5 x 6	27	17.00
	C	6 x 6	25, 30	37.00
	D	7 x 6	26	18.00
	E	7 x 7	24	28.00

#### 4. CONCLUSÃO

Este trabalho mostra que a programação linear é uma técnica indicada para situações onde existe um grande número de informações e se busca uma análise agregada. Existem diversas outras linhas de pesquisa que podem contribuir para o aprimoramento das áreas de Economia e Planejamento Florestal, entretanto, a programação linear, dentre os

instrumentos que podem facilitar o processo de tomada de decisão em atividades de gerenciamento florestal, é possivelmente aquela que apresenta maior potencial.

## **5. LITERATURA CITADA**

CLUTTER, J.L et alii. *Timber Management: a qualitative approach*. New York, John Wiley, 1983. 351p.

DAVIS, L.S. & JOHNSON, K.N. *Forest Management* (3<sup>rd</sup>. ed.). New York. McGraw-Hill, 1987. 790p.

DYKSTRA, D.P. *Mathematical programming for natural resource management*. New York, McGraw-Hill, 1984. 336p.

JOHNSON, K.N. & SCHEURMAN, H.L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives – Discussion and Synthesis. *Forest Sciences Monograph*, Washington, **18**: 1-31, 1977.

LEUSCHENER, W.A. *Introduction to Forest Resource Management*. New York, John Wiley, 1984. 304p.

NEWMAN, D.H. The optimal forest rotation: a discussion and annotated bibliography. *USDA Forest Service. SE GTR*, Asheville, **48**: 1-47, abr.1988.

RODRIGUEZ, L.C.E. et alii. Programação linear no planejamento florestal: uma aplicação prática. *Silvicultura*, São Paulo, **11** (41): 163-8, 1986.

WARE, G.O. & CLUTTER, J.L. A mathematical programming system for the management of industrial forests. *Forest Science*, Washington, **17**(4): 428-445, 1971.

## ANEXO A

### PLANO ANNUAL DE MANEJO DA FAZENDA MODELO

Ano	Sub-estratos	Idade de Corte (anos)	Tipo de Intervenção	Área Explorada (ha)	Volume Esperado (m <sup>3</sup> <i>ssc</i> )	Volume Total (m <sup>3</sup> <i>ssc</i> )
1	IIA	6	CR	49,4	6.669,0	14.565,0
	IVA, IVB	5	CC	47,0	7.896,0	
2	IIB	6	CR	25,6	4.044,8	11.185,8
	IVC	6	CC	37,0	7.141,0	
3	IVD, IVE	7	CC	46,0	10.488,0	10.488,0
4	IB	6	CR	91,1	6.923,6	8.815,1
	IIIA	5	CR	19,5	1.891,5	
5	IA	7	CR	88,9	7.023,1	10.317,1
	IIIB	6	CR	30,5	3.294,0	
6	IC	8	CR	70,0	5.600,0	10.130,0
	IVA	5	CR	30,0	4.530,0	
7	IIA	6	CC	49,4	8.694,4	11.771,4
	IVB	6	CR	17,0	3.077,0	
8	IVC	6	CR	37,0	6.697,0	6.697,0
9	IIB	7	CC	25,6	5.068,8	10.959,3
	IIIA	5	CC	19,5	2.632,5	
	IVD	6	CR	18,0	3.258,0	
10	IA	5	CC	88,9	10.934,7	29.750,5
	IB	6	CC	91,9	12.571,8	
	IVE	7	CR	28,0	6.244,0	
11	IIIB	6	CC	30,5	4.910,5	9.950,5
	IVA	5	CC	30,0	5.040,0	
12	IC	6	CC	70,0	9.660,0	12.516,0
	IVB	5	CC	17,0	2.856,0	
13	IIA	6	CR	49,4	8.200,4	8.200,4
14	IIIA	5	CR	19,5	2.359,5	9.500,5
	IVC	6	CC	37,0	7.141,0	
15	IB	5	CR	91,9	9.292,2	9.292,2
16	IA	6	CR	88,9	11.112,5	24.661,7
	IIB	7	CR	25,6	4.915,2	
	IVA	5	CR	30,0	4.530,0	
	IVD	7	CC	18,0	4.104,0	
17	IIIB	6	CR	30,5	4.636,0	11.020,0
	IVE	7	CC	28,0	6.384,0	
18	IC	6	CR	70,0	8.750,0	11.827,0
	IVB	6	CR	17,0	3.077,0	
19	IIA	6	CC	49,4	8.694,4	11.326,9
	IIIA	5	CC	19,5	2.632,5	
20	IVC	6	CR	37,0	6.697,0	6.697,0
21	IA	5	CC	88,9	12.571,8	28.546,5
	IB	6	CC	91,9	10.934,7	
	IVA	5	CC	30,0	5.040,0	