

## **SISTEMA PARA SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO DE *Pinus taeda* L. E AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE REGIMES DE MANEJO<sup>1</sup>**

Edilson Batista de Oliveira<sup>2</sup>, Sebastião do Amaral Machado<sup>2</sup> e Afonso Figueiredo Filho<sup>3</sup>

**RESUMO** - Foi desenvolvido um sistema computadorizado que integra métodos de engenharia econômica a um simulador de crescimento e produção de povoamentos de *Pinus taeda* L., implantados na Região Sul do Brasil. O sistema é constituído por três softwares: (a) o simulador SISPINUS -Versão 2.0, elaborado a partir da primeira versão do "NCSU Simulator- SISPINUS", de forma a possibilitar, além da simulação de desbastes, do crescimento e da produção anual do povoamento, o sortimento de madeira por classe diamétrica, para usos múltiplos, das árvores provenientes de desbastes e do corte final; (b) o software PLANIN, que possibilita o cálculo dos parâmetros de avaliação econômico-financeira e a análise de sensibilidade da rentabilidade a diferentes taxas de atratividade; e (c) o software REPLAN, que gerencia um banco de dados sobre a rentabilidade de regimes de manejo, tendo por base o índice de sítio, a taxa de atratividade e a idade de rotação do povoamento. A integração dos softwares SISPINUS, PLANIN e REPLAN tornou possível a análise conjunta dos fatores biológicos e econômicos. Assim, o sistema constitui uma ferramenta fundamental para o planejamento sustentável da produção de florestas de *Pinus taeda*.

Palavras-chave: Manejo de florestas, distribuição probabilística e planejamento florestal.

## **A GROWTH AND YIELD SIMULATOR FOR *Pinus taeda* L. AND ECONOMIC EVALUATION OF MANAGEMENT SYSTEMS**

**ABSTRACT** - A computerized system linking economic engineering methods to a growth and yield simulator for southern Brazilian *Pinus taeda* L. forests was developed. The system has three modules: (a) the simulator SISPINUS -Version 2.0, developed from "NCSU Simulator- SISPINUS", which simulates thinning, annual growth yield and sorting of wood for multiple uses according to diameter classes; (b) PLANIN, a program which allows the determination of economic and financial parameters and a sensitivity analysis of profitability at different discount rates; and, (c) REPLAN, a program managing a data bank on the profitability of different management systems, based on site indexes, discount rates and forest rotation cycles. The interaction of these systems allows an integrated analysis of biologic and economical factors which is fundamental for the sustainable production planning of *Pinus taeda* L. forests.

Key-words: Forest management, probability distribution, forest planning.

<sup>1</sup> Recebido para publicação em 30.7.1997.

Aceito para publicação em 8.4.1998.

<sup>2</sup> Einbrapa-Florestas. Estrada da Ribeira, km 111, 83411-000 Colombo-PR <sup>3</sup> Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 2959, 80035-000 Curitiba-PR

## 1. INTRODUÇÃO

Para o planejamento da produção de uma empresa florestal, é fundamental o conhecimento do crescimento e da produção futura da floresta, que pode ser obtido com técnicas de modelagem de crescimento e de produção. Estas técnicas tornam possíveis a avaliação de intervenções silviculturais e a realização de análises econômico-financeiras.

Para que um sistema de prognose do crescimento e da produção de povoamentos de *Pinus* possa possibilitar a simulação de desbastes e a separação das estimativas de volume total de madeira em volumes para cada finalidade industrial, ele deve estar baseado em funções de densidade de probabilidades que permitam descrever as distribuições de diâmetro e de altura das árvores do povoamento, em diversas condições de sítio, idade e número de árvores por hectare.

Várias funções de densidade de probabilidade podem ser utilizadas para descrição de distribuição de diâmetros em povoamentos florestais. Alguns exemplos são: Log-normal (BLISS e REINKER, 1964), Gamma (NELSON, 1964), Beta (CLUTTER e BENNETT, 1965), Weibull (BAILEY e DELL, 1973) e SB.

HAFLEY e SCHREUDER (1977) compararam as distribuições Beta, SB, Weibull, Log-normal, Gamma e Normal, em termos de flexibilidade em assumir diferentes formas para descrição de distribuição de diâmetros, baseando-se nas relações possíveis entre o coeficiente de assimetria ao quadrado e o coeficiente de curtose, e concluíram que a distribuição Normal é a menos flexível, resultando apenas em um ponto possível. As distribuições de Weibull, Gamma e Log-normal resultaram em linhas, o que demonstra suas capacidades de assumir formas variadas; entretanto, as distribuições Beta e SB foram as mais flexíveis, porque as relações entre os coeficientes ocupam áreas dentro do plano cartesiano.

O critério de decisão para a realização de desbastes seletivos não é apenas em função de diâmetros. Leva-se em conta, além de aspectos

qualitativos como bifurcação e tortuosidade, a altura das árvores. Quando a correlação entre diâmetros e alturas é muito elevada, um modelo univariado com base apenas na distribuição de diâmetros é suficiente para gerar estimativas precisas do crescimento e da produção. Entretanto, à medida que essa correlação se reduz, a precisão do modelo também se reduz.

SCHREUDER e HAFLEY (1977) apresentaram uma extensão bivariada da distribuição SB, a SBB (JOHNSON 1949b), para descrição da distribuição marginal conjunta de diâmetros e alturas das árvores. Estes autores destacaram que uma distribuição bivariada possibilita uma melhor descrição das características dos povoamentos, nas diferentes idades, porque considera as medições de diâmetros e alturas de forma inter-relacionada.

Anteriormente, HAFLEY e SCHREUDER (1976), com esse mesmo objetivo, haviam estudado as formas bivariadas das distribuições Weibull, Log-normal e Gamma, entretanto os autores concluíram que na forma bivariada não era possível associar seus parâmetros às relações diâmetro-altura.

As distribuições SB e SB bivariada (SBB) (JOHNSON, 1949a,h) foram introduzidas na ciência florestal, por HAFLEY e SCHREUDER (1977) e SCHREUDER e HAFLEY (1977), respectivamente. A distribuição SB descreve a distribuição marginal das variáveis diâmetro e altura de árvores de um povoamento, em diferentes idades, e a SBB descreve a distribuição conjunta dessas variáveis.

A função de distribuição SB é expressa como se segue:

$$f(x) = \frac{\delta\lambda}{\sqrt{2\pi(x-\xi)(\xi+\lambda-x)}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\gamma + \delta \ln\left(\frac{x-\xi}{\xi+\lambda-x}\right)\right]^2\right\} \quad (I)$$

em que

$$\xi < x < \lambda + \xi, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \xi < \infty, \delta > 0 \text{ e } \lambda > 0 \text{ e}$$

$$\gamma + \delta \ln\left(\frac{x-\xi}{\xi+\lambda-x}\right) = Z \sim N(0,1)$$

Os parâmetros  $\xi$  e  $\lambda$  representam, respectivamente, o menor limite da distribuição e a amplitude de variação de  $x$ . Os parâmetros  $\gamma$  e  $\delta$  são estimados pelo método da máxima verossimilhança, tendo por base as estimativas dos parâmetros da distribuição Normal.

Considerando-se

$$y_i = \frac{(x - \xi)}{\lambda} \quad \text{e} \quad f_i = \ln\left(\frac{y_i}{1 - y_i}\right)$$

$$\hat{\gamma} = -\delta \sum_{i=1}^n f_i / n \quad \implies \quad \hat{\gamma} = \delta \bar{f} \quad (2)$$

$$\hat{\delta} = \left[ \frac{n}{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2} \right]^{1/2} \quad \implies \quad \hat{\delta} = \frac{1}{s_f} \quad (3)$$

A construção da distribuição  $S_{BB}$  é baseada na distribuição  $S_B$ , juntamente com a distribuição Normal bivariada.

Seja  $D$  e  $H$  o diâmetro a 1,30 m e a altura total das árvores, respectivamente. Conforme HAFLEY e BUFORD (1985), as seguintes variáveis normais padronizadas podem ser definidas:

$$z_D = \gamma_D + \delta_D \ln\left(\frac{x_D - \xi_D}{\lambda_D + \xi_D - x_D}\right) \quad (4)$$

$$z_H = \gamma_H + \delta_H \ln\left(\frac{x_H - \xi_H}{\lambda_H + \xi_H - x_H}\right) \quad (5)$$

em que  $z_D$  e  $z_H$  têm distribuição Normal bivariada, com correlação  $\rho$ .

$$f(z_D, z_H) = \left[ 2\pi(1 - \rho^2)^{1/2} \right]^{-1} \exp\left[-\frac{1}{2}(1 - \rho^2)^{-1}(z_D^2 - 2\rho z_D z_H + z_H^2)\right] \quad (6)$$

O coeficiente de correlação  $\rho$  é estimado por meio da expressão:

$$\hat{\rho} = \sum_{j=1}^n (z_{Dj}, z_{Hj}) / n \quad (7)$$

Os parâmetros  $\xi_D$  e  $\xi_H$  representam, respectivamente, os valores mínimos de  $D$  e  $H$  na população; e  $\lambda_D$  e  $\lambda_H$  representam as amplitudes de  $D$  e  $H$ . Os parâmetros  $\gamma_D$ ,  $\gamma_H$ ,  $\delta_D$  e  $\delta_H$  não podem ser relacionados às características individuais do povoamento florestal, mas podem ser estimados por meio das expressões (8) e (9) da distribuição  $S_B$ , ou conforme HAFLEY e BUFORD (1985), que apresentaram expressões mais simples para estimativa desses parâmetros, com base em expansões da série de Taylor, sendo:

$$\hat{\delta} = \frac{\lambda}{4\sigma_x} \quad (8)$$

$$\hat{\gamma} = \frac{2x_m - \xi - \lambda}{\lambda\delta} - \delta \ln\left(\frac{x_m - \xi}{\lambda + \xi - x_m}\right) \quad (9)$$

em que

$\sigma_x$  = desvio-padrão de  $x$  ( $x = H$  ou  $D$ ); e

$x_m$  = moda de  $x$ .

O valor de  $x_m$  é definido pelo valor de  $x$  que satisfaz a expressão

$$\frac{2(x - \xi)}{\lambda} - 1 = \delta \left[ \gamma + \delta \ln\left(\frac{x - \xi}{\lambda + \xi - x}\right) \right] \quad (10)$$

HAFLEY et al. (1982), aplicando a distribuição  $S_{BB}$ , apresentaram uma série de tabelas de produção de plantios de *Pinus taeda* não-desbastados. HAFLEY e BUFORD (1985) expandiram a distribuição  $S_{BB}$  para a prognose do crescimento e da produção de povoamentos florestais em que são praticados desbastes. Esses trabalhos serviram de base para o desenvolvimento do SISPINUS - Simulador do Crescimento e Produção de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L. no Brasil, conforme OLIVEIRA et al. (1989) e OLIVEIRA e OLIVEIRA (1992).

O presente trabalho teve por objetivo estabelecer um sistema computadorizado para prognose do crescimento e da produção de florestas de

*Pinus taeda* L., que possibilite a simulação de desbastes, do crescimento e da produção anual do povoamento e a obtenção de tabelas de sortimento de madeira por classe diamétrica, para multiprodutos provenientes de desbastes e do corte final. O sistema deverá dar suporte às análises econômico-financeiras de regimes de manejo e contemplar todos os segmentos de custos operacionais referentes às atividades de implantação, manutenção e exploração da floresta.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Material

O simulador de crescimento e produção teve por base o NCSU - Managed Pine Plantation Growth and Yield Simulator, desenvolvido por Hafley, W.L. da "School of Forest Resources of North Caroline State University, USA". A obtenção dos parâmetros da distribuição SBB e da função de mortalidade, bem como a introdução destes resultados no simulador, que recebeu a denominação de SISPINUS, foi realizada na Embrapa-Florestas, com consultoria do próprio W.L. Hafley, em 1989/1990.

Para construção do modelo de crescimento e produção, foram utilizados dados de altura total e diâmetro a 1,3 m (DAP) de árvores de *Pinus taeda* L., provenientes de 40 parcelas do Inventário Florestal Contínuo das Florestas Nacionais de Irati-PR, Três Barras-SC e São Francisco de Paula-RS. As áreas disponíveis por árvore no plantio variaram de 2,25 a 9,00 m<sup>2</sup>. As idades variavam de 6 a 30 anos, com média de quatro medições sucessivas. Duas de cada três parcelas haviam sofrido desbastes usuais (seletivos, sistemáticos ou a combinação destes). A validação dos modelos ajustados foi realizada com inventários contínuos de outras localidades.

Neste trabalho, o software SISPINUS foi ampliado para possibilitar a separação das estimativas de volume total de madeira em

volumes parciais, calculados especificamente para segmentos do tronco com dimensões adequadas a cada finalidade industrial.

### 2.2. Sistema para Prognose do Crescimento e da Produção de *P. taeda*

#### 2.2.1. Ajuste das Distribuições

Em cada povoamento, para cada idade, a partir dos pares de valor altura/diâmetro, foram obtidos os parâmetros da distribuição  $S_{BB}$ , referentes a: menor e maior altura e diâmetro, moda e desvio-padrão; e a correlação entre a altura e o diâmetro. Com esses valores, os nove parâmetros da distribuição puderam ser estimados.

Para elaboração do modelo de crescimento e produção, as estimativas dos parâmetros foram associadas, por meio de funções ( $f_i$  ou  $g_i$ ), ao número de árvores por hectare ( $S$ ) e à altura dominante ( $H_D$ ) ou idade do povoamento, utilizando-se o modelo de RICHARDS (1959), em que

Parâmetro de interesse =

$$f_1(S) \{1 - \exp[-H_D f_2(S)]\}^{f_3(S)} \quad (11)$$

Para o coeficiente de correlação  $\rho$ , foi utilizado o seguinte modelo:

$$\rho = g_1(S) + g_2(S) \cos[g_3(S)H_D] + g_4(S)H_D \quad (12)$$

Os valores de  $H_D$  e  $S$  são estimados, respectivamente, por meio da equação de classificação de sítios e da função de mortalidade.

#### 2.2.2. Equação para Classificação de Sítios

Foi utilizada a equação apresentada por OLIVEIRA et al. (1990), obtida para povoamentos dos Estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo:

$$H_D = IS \left\{ \exp\left(-5,2204 \left[ (1/I)^{0,36} - 0,3772 \right] \right) \right\} \quad (13)$$

em que

$H$  = altura dominante na idade  $I$ ; e

$IS$  = índice de sítio (altura dominante aos 15 anos).

### 2.2.3. Modelagem de Mortalidade

Para descrição da mortalidade, foi utilizada a distribuição binomial negativa, que, segundo BLISS (1953), pode ser expressa por:

$$P(x) = \frac{(k+x-1)!}{x!(k-1)!} \left(1 + \frac{m}{k}\right)^{-k} \left(\frac{m}{m+k}\right)^x \quad (14)$$

em que

$x$  = número de árvores mortas;

$P(x)$  = probabilidade da existência de  $x$  árvores mortas;

$k$  = parâmetro referente à taxa de mortalidade; e

$m$  = altura média das árvores.

As estimativas dos parâmetros são obtidas pelas expressões:

$$k = \frac{m^2}{s_x^2 - m} \quad (15)$$

em que

$m$  = média aritmética; e

$s_x^2$  = variância amostral.

As estimativas desses valores podem ser relacionadas ao índice de sítio (IS), dado pela altura dominante aos 15 anos, e ao número de árvores inicial ( $N_0$ ). Esta relação é obtida pelos seguintes modelos de regressão:

$$m = b_0 N_0^{(b_1+b_2IS)} \cdot e^{b_3IS} \quad (16)$$

e

$$s_x^2 = b_0 + b_1IS + b_2IS^{b_3} \cdot \left(\frac{10.000}{N_0}\right)^{0,5} \quad (17)$$

em que de  $b_0$  a  $b_3$  são coeficientes.

Neste estudo, os coeficientes e os parâmetros apresentados por HAFLEY e BUFORD (1985) serviram de base para o sistema, a partir da observação de HAFLEY (1989), de que os povoamentos de *P. taeda* no sul do Brasil, aos 15 anos de idade, apresentam condições de desenvolvimento e mortalidade equivalentes aos povoamentos

dessa espécie, aos 25 anos, no sudeste dos Estados Unidos.

Essas equações foram:

$$m = 33,8 N_0^{-(0,02359+0,004745IS)} \exp(0,04582IS) \quad (18)$$

e

$$s_x = -5,3 + 0,3IS - S(0,3992 * 10^{-6} IS^{3,615}) \quad (19)$$

Foi realizado, também, um estudo comparativo dos resultados de simulações de mortalidade com as mortalidades ocorridas nas parcelas permanentes disponíveis, o que validou o modelo.

### 2.2.4. Estimativa da Produção

Para estimativa da produção do povoamento florestal, foi utilizada a distribuição SBB, conforme a metodologia apresentada por HAFLEY e BUFORD (1985), cujos parâmetros são definidos em função das características do povoamento e do número de árvores por hectare na idade estudada.

Os valores do diâmetro quadrático médio, da área seccional e da altura média são obtidos a partir do primeiro e do segundo momento das distribuições SB e SBB. A integração da distribuição SBB em relação às duas variáveis possibilita o cálculo da tabela de frequência por classes de diâmetro e altura.

Sendo a variável

$$y_i = \frac{(x - \xi)}{\lambda} \quad (20)$$

de distribuição SB, a área basal por árvore (AB) será obtida por:

$$E[AB] = E[KD^2] = KE[(\gamma_D \lambda_D + \xi_D)^2] \quad (21)$$

$$AB = K[\gamma_D^2 \mu'_{2D} + 2\xi_D \lambda_D \mu'_{1D} + \xi_D^2] \quad (22)$$

em que

$\mu'_{1D}$  e  $\mu'_{2D}$  = primeiro e segundo momento não-central da distribuição  $S_B$  para o diâmetro.

### 2.2.5. Simulação de Desbastes

O modelo desenvolvido possibilita a simulação de desbastes sistemáticos, seletivos e, também, mistos, em que se processa primeiro o desbaste sistemático e, em seguida, nas linhas remanescentes, o seletivo.

Para estimar a produção das árvores remanescentes, bem como simular o crescimento do povoamento após cada desbaste, podem ocorrer duas situações:

1. Se o desbaste é apenas sistemático, os parâmetros da distribuição SBB não serão alterados; apenas o número de árvores remanescentes sofrerá mudanças.

2. Se o desbaste adotado for seletivo ou misto, a distribuição SBB deverá ser truncada, em função de ambas as variáveis.

O ponto de truncamento é definido por meio de um processo iterativo de coordenadas ao longo da linha, em que  $Y_0 = Y_H$ . Esta relação pode ser expressa por

$$\frac{x_D - \xi_D}{\lambda_D} = \frac{x_H - \xi_H}{\lambda_H} \quad (23)$$

O ponto inicial para o processo iterativo tem coordenadas  $x_D$  e  $x_H$  e vai até o ponto em que se atinge o número de árvores ou a área basal que deverá permanecer.

Os valores mínimos das duas variáveis serão equivalentes ao ponto de truncamento e os valores máximos serão os mesmos da distribuição não-truncada.

$$\rho = \frac{\mu_{1D,H}'}{(\mu_{2D}' \mu_{2H}')^{1/2}} \quad (24)$$

em que

$\mu_{1D,H}'$  = primeiro momento em relação à média da distribuição Normal bivariada truncada, em relação às duas variáveis;

$\mu_{2D}'$  e  $\mu_{2H}'$  = segundo momento em relação à média da marginal distribuição Normal bivariada truncada, em relação às duas variáveis.

Os desvios-padrão  $s_D$  e  $s_H$  são obtidos por

$$s_i = \frac{4(\mu_{2i}')}{\lambda_i}; i = D \text{ ou } H \quad (25)$$

O valor da moda de  $D$  e  $H$  é dado pela expressão

$$\rho \delta_i \exp(-z_{mi}^2) = \delta_i [\pi(1-\rho^2)/2]^{1/2} [z_{mi} - 1 - 2y_{mi}] \psi(z_{mi}); i = D \text{ ou } H \quad (26)$$

em que

$$Z_{mi} = \gamma_i + \delta_i \ln \left( \frac{\gamma_{mi}}{1 - \gamma_{mi}} \right); i = D \text{ ou } H \quad (27)$$

$$y_{mi} = \frac{x_{mi} - \xi_i}{\lambda_i}, \quad (28)$$

$$\psi(z_{mi}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_{mi}}^{\infty} e^{-u^2/2} du \quad (29)$$

### 2.2.6. Equações de Afilamento "Taper" e de Volume

Para obtenção das equações de afilamento "taper" e de volume, foram utilizados os dados provenientes de Rio Negrinho-Se, relativos a 200 árvores de *Pinus taeda* L., nos quais foram medidos os diâmetros com casca na base das árvores e nas proporções dos 10, 30, 50, 70 e 90% da altura total. Será utilizado o modelo de quarto grau de PRODAN (1965), geralmente eficiente para descrição do perfil longitudinal do tronco de *Pinus*, sendo:

$$\frac{d_i}{D} = b_1 \left( \frac{h}{H} \right) + b_2 \left( \frac{h}{H} \right)^2 + b_3 \left( \frac{h}{H} \right)^3 + b_4 \left( \frac{h}{H} \right)^4 \quad (30)$$

em que

$D$  = diâmetro a 1,3 m (DAP);

$H$  = altura total da árvore;

$d_i$  = diâmetro medido à altura  $h_i$  do fuste;

$$h = H - h_i; e$$

$b_0$  a  $b_4$  = coeficientes.

### 2.3. Critérios de Avaliação Econômica de Projetos Florestais

Para a atividade florestal, a base para o planejamento está na determinação dos regimes de manejo, principalmente no que se refere à idade para o corte final, ou para a rotação do povoamento, que possibilite a máxima rentabilidade. Os critérios econômicos para determinação dessa rentabilidade em função de idades de rotação foram discutidos por OLIVEIRA et al, (1997).

Tais critérios serviram de base para elaboração dos softwares para análise econômica no presente trabalho, que são: valor presente líquido, valor presente líquido anualizado, taxa interna de retorno, razão benefício/custo e valor esperado da terra.

Os softwares desenvolvidos foram denominados PLANIN e REPLAN. O primeiro possibilita o cálculo dos parâmetros de avaliação econômica, bem como a realização de análises da sensibilidade do valor presente líquido e do valor presente líquido anualizado, a diferentes taxas de atratividade, O segundo utiliza dados gerados pela análise de sensibilidade do PLANIN, sobre a rentabilidade de regimes de manejo em diferentes idades de rotação.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Sistema para Prognose do Crescimento e da Produção de *P. taeda*

#### 3.1.1. Estimativas dos Parâmetros da Distribuição SBB

As equações desenvolvidas com base nos modelos (11) e (12), relacionando as estimativas dos parâmetros da distribuição SBB com o número de árvores por hectare, a idade ou a altura dominante das parcelas de inventário contínuo, são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Equações usadas para a estimativa das características dos povoamentos

Table 1 - Equations used to estimate stand characteristics

1.	$H_D = \exp\left\{a_1 \left[ \left( \frac{1}{I} \right)^{b_1} - \left( \frac{1}{15} \right)^{b_1} \right] \right\} S$
2.	$H_m = H_D (a_2 + b_2 I)$
3.	$H_1 = H_D a_3 [1 - \exp(-b_3 I)]$
4.	$s_H = a_4 [1 - \exp(-b_4 I)]^{c_4}$
5.	$D_D = a_5 [1 - \exp(-b_5 H_D)]^{c_5}$
6.	$D_1 = D_D a_6 [1 - \exp(-b_6 H_D)]$
7.	$D_1 = D_D a_7 [1 - \exp(-b_7 H_D)]^{c_7}$
8.	$s_D = a_8 [1 - \exp(1 - b_8 H_D)]^{c_8}$
9.	$\rho(Z_D, Z_H) = a_9 + b_9 \cos(c_9 H_D) + d_9 H_D$

em que  $H_D$  = altura dominante;  $D_D$  = maior diâmetro;  $H_m$  e  $D_m$  = moda das alturas e dos diâmetros;  $H_1$  e  $D_1$  = menor altura e menor diâmetro;  $s_H$  e  $s_D$  = desvios-padrão das alturas e dos diâmetros;  $I$  = idade do povoamento; e  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  e  $d_i$  são coeficientes.

	$a_i$	$b_i$	$c_i$
1	-5,2204	0,36	
2	0,86165 - 0,2119/S <sup>2</sup>	0,00973 + 0,001596/S	
3	0,5840 + 0,0131S	0,0385	
4	23,164 - 1,9477.S - 0,1141.S <sup>2</sup>	0,01198 + 0,00799S	0,88
5	5,025 + 7,0393S - 0,4284.S <sup>2</sup>	0,0245 - 0,00672S + 0,00845S <sup>2</sup>	1,1615 - 0,1478S + 0,0259S <sup>2</sup>
6	0,8439 - 0,3240/S	0,0467 + 0,971/S	
7	0,0800 - 0,5227/S	0,0226 + 0,0172/S	5,568 - 4,8647/S
8	2,03	0,0240 + 0,001598/S	2,1640 - 0,1686.S
9	0,91 . exp(-0,0348S)	0,1188.S <sup>0,4139</sup>	0,0445 + 0,0245/S

$$d_9 = 0,000708 + 0,000389/S.$$

$$\text{em que } s = \sqrt{\frac{10.000}{n^2 \text{ de árvores / ha}}}$$

#### 3.1.2. Função de Afilamento "Taper" e Sortimento de Madeira

A equação obtida para descrição do afilamento do tronco foi

$$\frac{d_i}{D} = 1,2096 \left( \frac{h}{H} \right) + 1,7761 \left( \frac{h}{H} \right)^2 - 4,6178 \left( \frac{h}{H} \right)^3 + 2,8225 \left( \frac{h}{H} \right)^4 \quad (31)$$

O volume de segmentos do tronco pode ser estimado por integração da expressão (31), conforme a expressão

$$\text{Volume} = \left[ \frac{\pi D^2}{4} * \int_{h_1}^{h_2} \left[ b_1 \left( \frac{h}{H} \right) + b_2 \left( \frac{h}{H} \right)^2 + \dots + b_4 \left( \frac{h}{H} \right)^4 \right]^2 dh \right] \quad (32)$$

em que  $h_1$  e  $h_2$  são os valores referentes às alturas medidas na base inferior e na base superior do respectivo segmento.

No cálculo do volume total, o valor  $h_1$  de  $h$ , é igual a  $H$ ; então

$$V_{\text{total}} = \left( \frac{D^2 \pi}{4} \right) [\text{soma dos coef. da integral da (F.de "Taper").}^2 * H] \quad (33)$$

Para a equação obtida

$$V_{\text{total}} = \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) * ((0.4676) * H) \quad (34)$$

Com a equação de afilamento "taper", o volume total e o volume por classes diamétricas podem ser fornecidos em tabelas de sortimento, em função de diâmetros e comprimentos de toras previamente dimensionados.

Com base nesses resultados, o SISPINUS 1.0 foi ampliado para gerar prognose da produção, por classes de diâmetro, das árvores provenientes de desbastes e do corte final.

Como exemplo tem-se um povoamento que aos oito anos dispõe de 1.850 árvores/há e área basal de 45m<sup>2</sup>/ha. O regime de manejo adotado considera um primeiro desbaste aos nove anos, sistemático de uma a cada três linhas, seguido de seletivo por baixo, até 1.200 árvores; um segundo desbaste aos 12 anos (seletivo de 40% da população); e um terceiro aos 16 anos (seletivo de 30% da população). As informações solicitadas pelo SISPINUS encontram-se no Quadro 2.

O processamento dessas informações fornece os resultados apresentados no Quadro 3.

No Quadro 4, são apresentadas as tabelas de sortimento de madeira, referentes às árvores retiradas nos três desbastes realizados e para o corte final, considerando intervalos de classe de 4,0 em.

Quadro 2 - Informações solicitadas pelo SISPINUS  
Table 2 - Information required by SISPINUS

1. ÍNDICE DE SÍTIO.....	21,0 m
2. Nº DE ÁRVORES AOS 8 ANOS.....	1850
3. ÁREA BASAL AOS 8 ANOS (m <sup>2</sup> /ha).....	45
4. RELATÓRIOS	
Idade Inicial.....	8 anos
Idade Final.....	22 anos
Intervalos de.....	2 anos
5. IDADE DO PRIMEIRO DESBASTE.....	9 anos
6. EQUAÇÃO DE SITIO.....	EqSit1
7. EQUAÇÃO DE VOLUME .....	EqVol1
8. DIMENSÕES DE TORAS E SORTIMENTO	

As produções estão ilustradas no Quadro 5, considerando-se cortes finais dos 18 aos 30 anos.

### 3.2. Análise Econômico-Financeira: Os softwares PLANIN e REPLAN

De posse dos resultados, pode-se efetuar a análise econômico-financeira por meio do PLANIN e do REPLAN. Considerando o exemplo 1, com rotação aos 22 anos, adotando-se os custos e preços apresentados no Quadro 6, para uma taxa de atratividade de 6% ao ano, por meio do software PLANIN, o sistema mostrará uma tabela de análise de sensibilidade para rentabilidade econômica em função de taxas de atratividade, outra para o fluxo de caixa da idade de plantio à idade de corte final e outra para os parâmetros para análise econômico-financeira. Esta última é apresentada no Quadro 7.

Considerando as idades de rotação entre os 18 e 30 anos e as taxas de atratividade entre 6 e 12%, por meio do terceiro software, o REPLAN, efetua-se a análise de sensibilidade, conforme a Figura 1, na qual se observa que, para taxas de atratividades de 6 e 8%, as idades ideais para rotação são 26 e 24 anos, respectivamente; para taxas de atratividades de 10 e 12%, o corte final deve ser antecipado para 22 anos.



**Quadro 3** - Crescimento e produção de *P. taeda*Table 3 - *P. taeda growth and yield*

Idade (anos)	Altura Dominante (m)	NQ de Árvores/Hectare	Diâmetro Médio (cm)	Altura Média (m)	Área Basal (m <sup>2</sup> )	Volume Total (m <sup>3</sup> )	IMA (m <sup>3</sup> )	ICA (m <sup>3</sup> )
8	12,5	1850	17,6	10,8	45,0	226,9	28,4	28,4
9	13,9	1844	18,6	12,0	50,1	280,3	31,1	53,5
Desbaste pela remoção de 1 linha em cada 3 linhas e, Em seguida, desbaste pela remoção de 30 árvores								
9		1199	18,8	12,0	33,1	186,3	REMOVIDO=	94,0
10	15,3	1197	19,7	13,1	36,6	224,8	31,9	38,5
12	17,7	1189	21,8	15,2	44,2	314,8	34,1	45,8
Desbaste pela remoção de 476 árvores								
12		714	24,1	16,0	32,7	245,0	REMOVIDO=	69,7
14	19,8	711	25,9	18,0	37,3	314,3	34,1	38,9
16	21,9	707	27,6	19,8	42,4	393,2	34,8	39,6
Desbaste pela remoção de 212 árvores								
16		496	29,2	20,3	33,3	317,1	REMOVIDO=	76,0
18	23,6	494	30,7	22,1	36,5	377,1	34,3	36,3
20	25,5	491	32,4	23,8	40,3	448,4	34,4	35,5
22	27,3	487	33,8	25,3	43,7	518,2	34,5	34,7

**Quadro 4** - Sortimentos de madeira por classe diamétrica

Table 4 - Assortment woods by diameter class

Diâmetro (cm)		Desbaste (9 anos) - Thinning (9 years)							
Lim. de Classe	N/ha	Altura Média	Volume (m <sup>3</sup> /ha)						
			Total	Lamin. ESII.	Lamin.	Serraria	Celulose	Energia	
5,8 - 7,9	3	8,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
8,0 - 11,9	66	10,2	2,4	0,0	0,0	0,0	1,2	1,2	
12,0 - 15,9	148	11,2	11,5	0,0	0,0	0,0	9,9	1,5	
16,0 - 19,9	210	11,9	28,6	0,0	0,0	13,0	13,2	2,4	
20,0 - 23,9	177	12,6	38,3	0,0	0,0	27,2	9,1	2,0	
24,0 - 27,9	41	13,4	13,1	0,0	3,4	8,0	1,3	0,4	
TOTAIS	645		94	0,0	3,4	48,2	34,8	7,6	
Diâmetro (cm)		Desbaste (12 anos) - Thinning (12 years)							
Lim. de Classe	N/ha	Altura Média	Volume (m <sup>3</sup> /ha)						
			Total	Lamin. Esp.	Lamin.	Serraria	Celulose	Energia	
10,1 - 11,9	9	12,8	0,5	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	
12,0 - 15,9	165	13,9	14,8	0,0	0,0	0,0	12,6	2,2	
16,0 - 19,9	210	14,7	32,4	0,0	0,0	12,4	18,1	1,9	
20,0 - 23,9	69	12,8	15,3	0,0	0,0	10,8	3,7	0,9	
24,0 - 27,9	20	13,4	6,2	0,0	1,6	3,8	0,6	0,2	
28,0 - 31,9	1	14,6	0,5	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	
TOTAIS	474		69,8	0,0	1,8	27,2	35,4	5,3	

Continua ...  
Over. ..

**Quadro 4 - Cont.**

Table 4 - Conto

			Desbaste (16 anos) - Thinning (16 years)					
Diâmetro (em)			Volume (m <sup>3</sup> lha)					
Lim. de Classe	N/ha	Altura Média	Total	Lamin. Esp.	Lamin.	Serraria	Celulose	Energia
18,6 - 19,9	15	18,5	3,6	0,0	0,0	2,0	1,4	0,2
20,0 - 23,9	135	19,3	43,3	0,0	0,0	30,4	11,0	1,9
24,0 - 27,9	41	17,4	17,3	0,0	3,6	11,7	1,8	0,3
28,0-31,9	17	17,6	9,5	0,0	4,7	3,5	1,0	0,2
32,0 - 35,9	3	18,0	24	05	12	0,6	01	00
TOTAIS	211		761	05	95	48,2	153	27

			Corte final (22 anos) - Final cut (22 anos)					
Diâmetro (em)			Volume (m <sup>3</sup> zha)					
Lim. de Classe	N/ha	Altura Média	Total	Lamin. Esp.	Lamin.	Serraria	Celulose	Energia
24,4 - 27,9	67	24,4	40,5	0,0	11,3	22,2	6,0	1,0
28,0 - 31,9	131	25,1	106,6	0,0	59,7	35,6	9,4	1,9
32,0 - 35,9	131	25,6	139,3	20,3	76,7	34,5	6,3	1,6
36,0 - 39,9	110	26,1	150,4	55,5	65,2	20,2	8,5	1,0
40,0 - 43,9	47	27,0	823	43,7	28,4	7,4	2,4	0,4
TOTAIS	486		519,1	1194	241,4	119,9	325	5,9

**Quadro 5 - Sortimentos de madeira do corte final. Idades de 18 a 30 anos**

Table 5 - Final cut assortment. Ages from 18 to 30 years

Corte Final		Volume (m <sup>3</sup> lha)				
Idade (anos)	Total	Lamin. Espn.	Lamin.	Serraria	Celulose	Energia
18	387,3	28,2	173,5	149,1	30,9	5,6
20	462,7	67,4	214,6	143,6	31,3	5,7
24	609,1	167,9	264,3	137,6	33,9	5,4
26	675,9	214,6	293,0	128,4	34,6	5,3
28	740,9	266,9	296,4	140,2	32,3	5,5
30	799,9	317,3	316,6	130,7	29,9	5,4

**Quadro 6 - Custos e preços referentes ao exemplo 1**

Table 6 - Costs and prices for example 1

Custos (US\$)		Preços da Madeira (US\$) e Juros (%)	
1. Implantação.....	700,00/ha	13. Lam. Especial .....	47,75/m <sup>3</sup>
2. Corte.....	0,98/m <sup>3</sup>	14. Laminação .....	27,91/m <sup>3</sup>
3. Desgalhamento .....	0,18/m <sup>3</sup>	15. Serraria .....	17,81/m <sup>3</sup>
4. Extração.....	1,00/m <sup>3</sup>	16. Celulose .....	8,94/m <sup>3</sup>
5. Traçamento.....	0,16/m <sup>3</sup>	17. Energia .....	7,72/m <sup>3</sup>
6. Carregamento.....	0,71/m <sup>3</sup>	18. Taxa Atratividade.....	6,0 %/ano
7. Transporte.....	2,30/m <sup>3</sup>		
8. Descarregamento.....	0,67/m <sup>3</sup>		
9. Administração.....	20,00/ha		
10. Outros.....	/m <sup>3</sup>		
11. Outros.....	//m <sup>3</sup>		
12. Custo da terra.....	//m <sup>3</sup>		

## Quadro 7 - Parâmetros para análise econômico-financeira (US\$/ha)

Table 7 - Parameters for economic and financial evaluation (US\$/ha)

Parâmetros para Análise Econômico-Financeira	US\$
Receita Total	16.879,92
Receita Total Líquida	10.830,52
Receita Total Média	767,27
Custo Total	6.049,40
Custo Total Médio	274,97
Receita Líquida Média	492,30
Valor Presente da Receita	4.968,41
Valor Presente dos Custos	2.599,41
Valor Presente Líquido	2.369,00
Valor Presente Líquido Anualizado	196,73
Razão Benefício/Custo	1,91
Valor Esperado da Terra	3.278,92
Taxa Interna de Retorno	12,40

## 4. CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido, as equações obtidas, os estudos de modelagem do crescimento e da produção florestal e a análise econômico-financeira possibilitaram as seguintes conclusões:

- A distribuição SBB apresentou flexibilidade e eficiência para descrição das características dos povoamentos nas diferentes idades e para obtenção de estimativas da distribuição conjunta de diâmetros e alturas das árvores de povoamentos de *P. taeda*.
- A utilização de equações de afilamento "taper" para o cálculo do volume total e do volume de madeira para multi produtos e sua incorporação ao SISPINUS tornaram possível a avaliação da produção madeireira, de forma adequada às condições do mercado consumidor ou de demanda da empresa, permitindo que o usuário informe as dimensões de tora desejadas para cada classe de utilização da madeira.

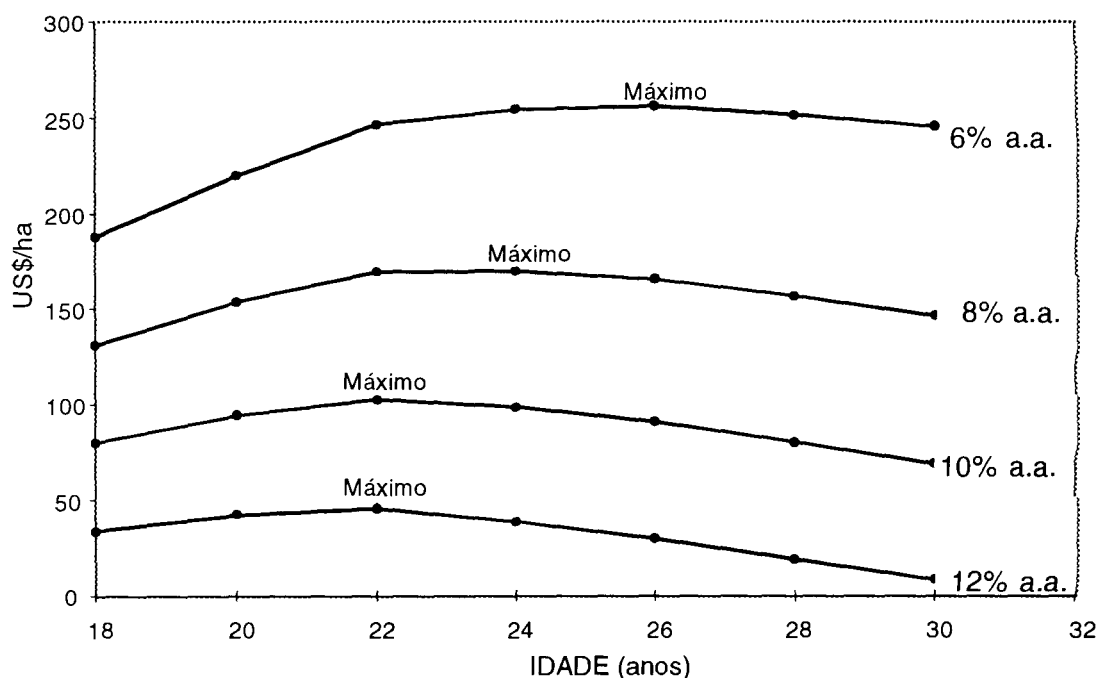


Figura 1 - Valores presentes líquidos anualizados em função de idades de rotação e taxas de atratividade.

Figure 1 - Annualized net present values based on rotation cycle and discount rates.

- A eficácia do simulador na prognose do crescimento e da produção de florestas de *Pinus taeda* L. foi comprovada por comparação com os dados de campo e por meio de contactos mantidos com usuários do software.
- A integração dos softwares SISPINUS, PLANIN e REPLAN tornou possível a análise conjunta dos fatores biológicos e econômicos. Assim, o sistema constitui ferramenta fundamental para o planejamento da produção de florestas de *Pinus taeda*.
- Com base na semelhança existente entre *Pinus taeda* e outras espécies de *Pinus* cultivadas no Brasil, tanto em características de crescimento e produção como de manejo e multiprodutos da madeira, os modelos matemáticos e o algoritmo do SISPINUS podem servir de base para elaboração de simuladores destas espécies. Observa-se que, para cada espécie, é necessário determinar os parâmetros da distribuição SBB, tendo por base parcelas permanentes de inventário, e também obter as equações de sítio, equações de afilamento "taper" e equações de volume de madeira.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- BAILEY, R.L., DELL, T.R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. *Forest Science*, Bethesda, v. 19, p.97-104, 1973.
- BLISS, e.I. Fitting the negative binomial distribution to biological data. *Biometrics*, v.9, p.176-199, 1953.
- BLISS, D.M., REINKER, K.A. A lognormal approach to diameter distribution in even aged stands. *Forest Science*, Bethesda, v. 10, n. 3, p. 350-360, 1964.
- CLUFTER, J.L., BENNETT, F.A. Diameter distribution in old field slash pine plantation. S.I.: Georgia Forestry Resource Council, 1965. (Georgia Forestry Resource Council, 13).
- FENSTERSEIFER, J.E., SAUL, S. Investimentos de capital nas grandes empresas. *Revista de Administração*, São Paulo, v. 28, n. 3, p.3-12, 1993.
- R. *Árv.*, Viçosa-MG, v.22, n.L, p.99-111, 1998
- HAFLEY, W.L. Growth and yield model for *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* in Brasil. (Thirth consultancy visit); consultant final report nCA/EMBRAPA-PROCENSUL 11. Brasília: nCA/EMBRAPA, 1989. 9p. (Serie Publicações Miscelaneas, A4/BR-89-045).
- HAFLEY, W.L., BUFORD, M.A. A bivariate model for growth and yield prediction. *Forest Science*, Bethesda, v.31, n.1, p.237-247, 1985.
- HAFLEY, W.L., SCHREUDER, H.T. Some non-normal bivariate distributions and their potential for forest application. In: WORLD CONGRESS, 16, 1976, Oslo. Proceedings ... Oslo: International Union ForestResearch Organization, 1976. p.104-114.
- HAFLEY, W.L., SCHREUDER, H.T. Statistical distribution for fitting diameter and hight data in even-aged stand. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v.7, p.481-487, 1977.
- HAFLEY, W.L., SMITH, W.D., BUFORD M.A. A new yield production model for unthinned loblolly pine in plantations. Raleigh: Southern For. Res. Center, North Carolina State University, 1982. 63p. (Technical Report, 1).
- JOHNSON, N.L. Systems of frequency curves generalized by methods of translation. *Biometrika*, London, v. 36, p.149-176, 1949a.
- JOHNSON, N.L. Bivariate distributions based on simple translation systems. *Biometrika*, London, v.36, p. 297-304, 1949b.
- JOHNSON, N.L., KOTZ, S. Continuous univariate distributions-I. Boston: Houghton Mifflin, 1970.
- NELSON, T.e. Diameter distribution and growth of loblolly pine. *Forest Science*, Bethesda, v.10, n.1, p.105-114, 1964.
- OLIVEIRA, E.E., MACHADO, S.A., HOEFLICH, V.A. Análise econômica de regimes de manjo de pinus. Curitiba: EMBRAPA-CNPf, 1998. 51p. (Serie documentos).
- OLIVEIRA, E.E., OLIVEIRA, Y.M.M. SisPinus - Desenvolvimento e perspectivas. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO FLORESTAL, 2, 1991, Curitiba. Anais ... Curitiba: EMBRAPA-CNPf, 1992. p.347-360.

- OLIVEIRA, Y.M.M., OLIVEIRA E.B., HAFLEY, W.L. Classificação de sitio para povoamentos de *Pinus taeda* no sul do Brasil. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6, 1990, Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão: SBS, 1990. p.357-361.
- OLIVEIRA, Y.M.M., OLIVEIRA E.B., HAFLEY, W.L. SisPinus - Simulador de crescimento e produção de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* sob manejo no sul do Brasil. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO FLORESTAL, 1, 1989, Curitiba. Anais... Curitiba: EMBRAPA-CNPQ, 1989. p.107-118.
- PRODAN, M. **Holzmesselehre**. Sauerlanders: Verlag Frankfurt am Main, 1965.
- RICHARDS, F.J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.10, p.290-300, 1959.
- SCHREUDER, H.T., HAFLEY, W.L. A useful bivariate distribution for describing stand structure of tree height and diameter. **Biometrics**, Washington, v.33, p.471-477, 1977.