

DANIEL HENRIQUE BRED A BINOTI

**SISTEMAS COMPUTACIONAIS APLICADOS AO MANEJO FLORESTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B614s  
2012

Binoti, Daniel Henrique Breda, 1986-  
Sistemas computacionais aplicados ao manejo florestal  
/ Daniel Henrique Breda Binoti. – Viçosa, MG, 2012.  
vii, 113f. : il. ; 29cm.

Orientador: Helio Garcia Leite.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Florestas - Administração. 2. Eucalipto - Populações.  
3. Levantamentos florestais. 4. Software - Desenvolvimento.  
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.9524

DANIEL HENRIQUE BREDA BINOTI

**SISTEMAS COMPUTACIONAIS APLICADOS AO MANEJO FLORESTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

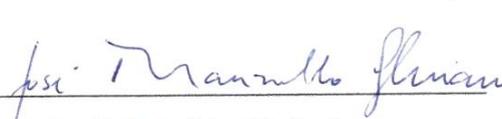
APROVADA: 1 de agosto de 2012.

  
\_\_\_\_\_

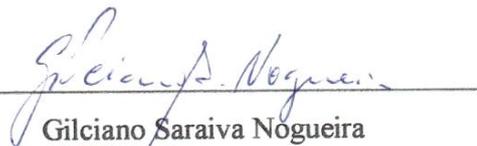
Agostinho Lopes de Souza

  
\_\_\_\_\_

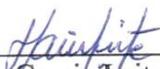
Márcio Leles Romarco de Oliveira

  
\_\_\_\_\_

José Marinaldo Gleriani  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_

Gilciano Saraiva Nogueira

  
\_\_\_\_\_

Helio Garcia Leite  
(Orientador)

**Dedico...**

...a Deus

...à Mayra e Ana Luiza

...à Maria José e Antonio Henrique

...à Maria da Penha, Enes, Eny e Braulino

## AGRADECIMENTOS

Deus.

À Mayra pelo apoio não somente na execução deste trabalho, mas em todos os momentos dessa nossa caminhada.

Ao professor Helio e à Silvana, meus eternos agradecimentos, pela oportunidade, pelos conselhos, pelos preciosos exemplos de atitude humana.

Ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro e oportunidades oferecidas.

Aos professores Agostinho, Márcio, Marinaldo e Gilciano pela participação na banca examinadora.

Aos bons amigos adquiridos durante a graduação, mestrado e doutorado e na estadia pelo alojamento.

## **BIOGRAFIA**

Daniel Henrique Breda Binoti é natural de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo. Filho de Antônio Henrique Santoline Binoti e Maria José Breda Binoti, nascido em 3 de maio de 1986.

Em 2003, após muita poeira e barro, formou-se técnico agrícola na Escola Agrotécnica Federal de Alegre (EAFA), em Alegre, ES.

Iniciou o curso de engenharia florestal na Universidade Federal de Viçosa em 2004, tendo o concluído em 2009, com votos de louvor pelo desempenho acadêmico e muita experiência culinária adquirida pelos serviços prestados no RU. No mesmo ano iniciou o mestrado, logo em seguida casou-se com Mayra Luiza Marques da Silva Binoti. Terminou o mestrado em julho de 2010.

Em agosto de 2010, iniciou o Programa de Doutorado em Ciência Florestal, na Universidade Federal de Viçosa. Teve uma filha em março de 2012 e submeteu-se à defesa da tese em agosto do mesmo ano.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT .....	vii
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 1 .....	3
Sistema computacional para regulação da produção florestal .....	3
CAPÍTULO 2 .....	55
Sistema computacional para a otimização de multiprodutos madeireiros .....	55
CAPÍTULO 3 .....	79
Sistema computacional para ajuste de funções densidade de probabilidade .....	79
CAPÍTULO 4 .....	97
Sistema computacional para seleção de dados para modelagem do crescimento e produção florestal.....	97
CONCLUSÕES GERAIS .....	113

## RESUMO

BINOTI, Daniel Henrique Breda, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2012. **Sistemas computacionais aplicados ao manejo florestal**. Orientador: Helio Garcia Leite. Coorientadores: Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro e José Marinaldo Gleriani.

Objetivou-se no presente trabalho iniciar diversos projetos com o intuito de gerar sistemas gratuitos, para auxiliar gestores florestais, acadêmicos e extensionistas, na resolução de alguns problemas do setor florestal. Os projetos iniciados são o RPF (sistema para regulação da produção florestal), OtimTotas (sistema para otimização de multiprodutos madeireiros), FitFD (sistema para ajuste de funções densidade de probabilidade), e o Select (sistema para seleção de dados para ajuste de modelos de crescimento e produção). Os projetos foram desenvolvidos utilizando a linguagem de programação Java. Como ambiente de desenvolvimento foi utilizado a IDE (*Integrated Development Environment*) Netbeans 7.1, e a JDK 7.3 (*Java Development Kit*). Os quatro sistemas foram implementados e estão disponibilizados gratuitamente no site NeuroForest (<http://neuroforest.ucoz.com/>) e se apresentaram flexíveis e eficientes para a resolução de problemas aos quais se dispõem.

## ABSTRACT

BINOTI, Daniel Henrique Breda, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2012. **Computer systems applied to forest management.** Adviser: Helio Garcia Leite. Co-Advisers: Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro and José Marinaldo Gleriani.

The objective of the present work to start several projects with the aim of generating free systems to assist forest managers, academics and extension in solving some problems in the forest sector. The projects are started the RPF (forest regulation system), OtimTotas (optimization of multiproduct of timber system), FitFD (system for fitting of probability density functions), and Select (system for selection of data for growth and yield modeling). The projects were developed using the Java programming language. As development environment we used the IDE (Integrated Development Environment) Netbeans 7.1 and JDK 7.3 (Java Development Kit) the four systems were implemented and are freely available on the site NeuroForest (<http://neuroforest.ucoz.com/>) and is presented for flexible and efficient resolution of problems to which they have.

## INTRODUÇÃO

O manejo dos recursos florestais exige dos gestores florestais a tomada de decisão considerando os mais variados elementos de ordem técnica, ambiental, social, política e principalmente econômica. Este fato originou diversos estudos com o intuito do desenvolvimento de técnicas e ferramentas para auxiliar os gestores florestais na tomada de decisão.

Atualmente algumas instituições de ensino e pesquisa do setor florestal dispõem de sofisticadas ferramentas para tomada de decisão. Dentre essas ferramentas destacam-se técnicas de inteligência artificial e computacional como redes neurais artificiais e busca heurística, bem como a parametrização e desenvolvimento de modelos matemáticos para os problemas comumente encontrados no setor.

Contudo, os profissionais atuantes no setor apresentam dificuldades de entendimento e aplicação das técnicas desenvolvidas pelas instituições de pesquisa, principalmente pela falta de ferramentas apropriadas para aplicações em nível operacional.

Esse trabalho propõe o desenvolvimento e utilização de softwares gratuitos para auxiliar os gestores florestais na tomada de decisão, principalmente na área de aplicação de técnicas de inteligência artificial, métodos estatísticos e técnicas de busca heurística. Os projetos desenvolvidos nesse trabalho foram o RPF, OtimToras, FitFD e Select. Todos eles e outros sistemas são disponibilizados gratuitamente no site NeuroForest (<http://neuroforest.ucoz.com/>). O foco da iniciativa é que os sistemas produzidos sejam empregados por professores, estudantes, engenheiros florestais, empresas e produtores florestais em geral.

A Tese foi dividida em quatro capítulos. Sendo cada capítulo destinado a descrição de um dos projetos iniciados na seguinte ordem RPF, OtimToras, FitFD e Select. Em cada capítulo é apresentado um caso de uso dos projetos desenvolvidos.

## **CAPÍTULO 1**

### **SISTEMA COMPUTACIONAL PARA REGULAÇÃO DA PRODUÇÃO FLORESTAL**

#### **INTRODUÇÃO**

O manejo florestal envolve a integração de práticas silviculturais e conceitos de econômicos de tal forma a alcançar os objetivos do proprietário ou organização florestal. Além disso, o reconhecimento da importância dos assuntos políticos, ambientais e sociais associados à floresta podem influenciar no planejamento da produção florestal (BETTINGER et al., 2009). O processo definido como planejamento florestal é tradicionalmente conhecido como regulação florestal, que antigamente baseava-se na obtenção da *floresta normal* (CLUTTER et al., 1983).

A floresta normal era formada por unidades de manejo com idades de corte iguais, sendo a produção determinada por uma tabela de produção normal, e estoque de crescimento normal. Todas as unidades de manejo possuíam a mesma capacidade produtiva e a classe de idades eram assumidas como sendo completamente balanceada. Como classe de idades balanceada entende-se que para cada classe de idade variando de 1 ano até a idade de regulatória encontra-se a mesma área de plantio (CLUTTER et al., 1983; LEUSCHNER 1984). A partir de meados da década de 60 os estudos sobre regulação florestal abandonaram o termo floresta normal e começaram a utilizar o termo floresta regulada (CLUTTER et al., 1983).

O conceito de floresta regulada diferencia-se por não envolver nenhuma referência ao estoque normal de crescimento e a produção em cada idade é dada por um

modelo de crescimento e produção que é aplicável para cada tipo e intensidade do manejo a ser adotada (CLUTTER et al., 1983). A floresta regulada consiste em uma estrutura de classes de idade variando desde um até a idade regulatória, sendo que cada classe de idade possui áreas iguais de plantio (LEUSCHNER 1984). Nesse tipo de floresta as produções em cada unidade de manejo podem ser diferentes, e o estoque de crescimento não apresenta-se como normal.

Segundo Davis (1966), as razões para a obtenção da floresta regulada são:

- ✓ produções anuais aproximadamente iguais em volume, tamanho, qualidade e valor da madeira promovendo uma base estável para o plano de negócios.
- ✓ o volume colhido anualmente e a renda são obtidos do estoque de crescimento, não sendo maiores do que o necessário.
- ✓ balanço entre receitas e custos anuais aproximadamente constantes.
- ✓ a estrutura balanceada de classes de idade permite um maior controle de pragas, doenças, ventos, queimadas, dentre outros possibilitando uma maior proteção florestal.
- ✓ um melhor aproveitamento dos demais usos das florestas, como recreação, proteção das fontes de água e proteção ambiental e benefícios sociais.
- ✓ uso regular e contínuo da mão-de-obra disponível.

A forma de implementação e obtenção da floresta completamente regulada é um documento conhecido como plano de corte (*harvest schedule, cutting schedule* ou plano de manejo). Esse documento lista quais unidades de manejo devem ser cortadas, plantadas, desbastadas, conduzidas ou reformadas, enfim todas as atividades que interferem nas unidades de manejo durante cada ano do horizonte de planejamento (CLUTTER et al., 1983). Contudo, além da obtenção da estrutura regulada, este plano tem como principal objetivo conduzir ao máximo de retorno da floresta aos interesses do proprietário, incluindo restrições de cunho ambiental e social associados a floresta.

A geração do plano de corte exige a necessidade de simulação de diferentes cenários, considerando variações que podem ocorrer na floresta ou no contexto socioeconômico e ambiental no qual o empreendimento está inserido, tais como, aumento de impostos, variação nas empresas prestadoras de serviços, custos adicionais de colheita ou silvicultura, venda de terras da empresa ou aquisição de novas áreas, aumento ou diminuição das demandas mínimas exigidas, dentre outros. A solução dos problemas de regulação florestal demandam sistemas computacionais (Rodrigues, 2001).

Diversos projetos relacionados a manejo de recursos florestais, podem ser encontrados na literatura, dentre eles destacam-se o Forplan (Forest Planning) (IVERSON e ALSTON, 1986), o Planflor (TAUBE NETTO, 1984), *SysFlor* (RODRIGUES 2001), SifPlan ([www.treesoftware.com.br](http://www.treesoftware.com.br)), Remsoft ([www.remsoft.com](http://www.remsoft.com)) e o OpTimber-LP([www.optimber.com.br](http://www.optimber.com.br)). Contudo, não foi encontrado na literatura software de regulação florestal, que se adeque as condições do setor florestal brasileiro, que possa ser utilizado gratuitamente por pequenos e médios proprietários, ou extensionistas, ou mesmo no meio acadêmico, de forma irrestrita. A existência de um software completo e de natureza livre pode auxiliar no ensino dos processos de regulação florestal em universidades bem como, ser empregado para o planejamento da produção em pequenas e médias empresas florestais.

## **OBJETIVO**

O objetivo do presente estudo foi de iniciar, desenvolver, implementar e validar um projeto de construção de um sistema computadorizado, para auxiliar os gestores florestais, acadêmicos e extensionistas, na construção de modelos de regulação da produção florestal, tendo como característica ser distribuído gratuitamente. São apresentados os princípios básicos do sistema de apoio à decisão desenvolvido (RPF – Regulação da Produção Florestal), destacando suas características e formas de resolução de problemas de regulação florestal, e formulados e resolvidos alguns modelos característicos de regulação florestal.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **DESENVOLVIMENTO DO PROJETO**

O RPF foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Java. Como ambiente de desenvolvimento foi utilizada a IDE (Integrated Development Environment) Netbeans 7.0.1, e a JDK 7 (Java Development Kit ). Os testes do sistema foram realizados em ambiente Windows. O software foi desenvolvido com o intuito da geração e interpretação de modelos matemáticos em formato de programação linear e programação inteira mista seguindo os critérios de formulação do modelo I conforme Johnson e Scheurman (1977).

O projeto RPF é formado de vários sistemas os quais são designados para a solução de situações específicas dos problemas de regulação da produção florestal. Cada capítulo desse trabalho representa uma abordagem para a solução de diferentes formulações do problema de regulação florestal. Neste capítulo é abordada a formulação e solução do modelo de regulação florestal utilizando a abordagem matemática clássica, com a solução do problema utilizando Programação Linear (PL) e Programação Inteira Mista (PIM). Uma demonstração sucinta da formulação matemática é apresentada para embasamento da demonstração do sistema.

### **PROGRAMAÇÃO LINEAR**

Na formulação clássica do modelo I de programação linear, a variável de decisão  $X_{ij}$  representa a fração de área da  $i$ -ésima unidade de manejo que deverá ser assinalada à

$j$ -ésima prescrição. Nessa formulação a floresta é dividida em unidades de manejo (UM) que apresentam características semelhantes com relação a capacidade produtiva, classe de idade, material genético, dentre outras (CLUTTER et al., 1983). Para cada UM são geradas todas as possíveis prescrições que possam ser adotadas. Essas prescrições representam uma sequência de ações preestabelecidas que ocorrerão ao longo do horizonte de planejamento, como corte, corte com reforma imediata, corte e venda de madeira, corte e condução, reforma, condução, desbaste, fertilização e desrama.

## FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo do modelo de programação linear expressa matematicamente o objetivo do proprietário. Diversos objetivos podem ser incluídos, considerando diversos aspectos de ordem econômica, social e ambiental, contudo, comumente encontra-se um dos seguintes objetivos: maximização do valor presente líquido global (VPL), minimização do custo total, maximização da produção ou minimização do custo médio de produção.

O Valor Presente Líquido (VPL) de um investimento é dado pela diferença dos valores de receitas e custos, corrigidos para um ano específico a uma determinada taxa de descontos. Na formulação matemática utilizando PL, o VPL é calculado por unidade de área (ha), por meio da seguinte expressão:

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j}$$

em que  $C_j$  são os custos do  $j$ -ésimo período por unidade de área;  $R_j$  são as receitas do  $j$ -ésimo período por unidade de área;  $i$  é a taxa de desconto;  $n$  é a duração do projeto em anos; e  $j$  é o período em anos.

A função objetivo visando maximizar o VPL global do investimento é:

$$Max. Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

em que  $Z$  é o valor presente líquido global (R\$);  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo;  $c_{ij}$  é valor presente líquido por unidade de área de cada unidade de manejo  $i$ , manejada segundo a alternativa de manejo  $j$ ;  $m$  é o número total de unidades de manejo;  $n$  é número total de alternativas de manejo para a  $i$ -ésima unidade de manejo.

A função objetivo para minimizar o custo total do investimento assume a seguinte configuração:

$$\text{Min. } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

em que  $Z$  é o custo total (R\$);  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo;  $c_{ij}$  é o custo corrigido para valor presente por unidade de área de cada unidade de manejo  $i$ , manejada segundo a alternativa de manejo  $j$ ;  $m$  é o número total de unidades de manejo;  $n$  é número total de alternativas de manejo para a  $i$ -ésima unidade de manejo.

Se o objetivo for a maximização do volume total produzido durante a duração do projeto, então a função objetivo é:

$$\text{Max. } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

em que  $Z$  é a produção total produzido pela floresta ( $\text{m}^3$ );  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo;  $c_{ij}$  é o volume produzido por unidade de área pela unidade de manejo  $i$ , manejada segundo a alternativa de manejo  $j$ ;  $m$  é o número total de unidades de manejo;  $n$  é número total de alternativas de manejo para a  $i$ -ésima unidade de manejo.

O Custo Médio de Produção (CMP) é o resultado da relação entre o custo total corrigido e a produção equivalente, ambos considerados no valor presente. A função objetivo tendo como objetivo minimizar o somatório do CMP da floresta assume a seguinte configuração:

$$\text{Min. } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

em que  $Z$  é o somatório do CMP (R\$/ $\text{m}^3$ );  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a área da  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo;  $c_{ij}$  é CMP de cada unidade de manejo  $i$ , manejada segundo a alternativa de manejo  $j$ ;  $m$  é o número total de unidades de manejo;  $n$  é número total de alternativas de manejo para a  $i$ -ésima unidade de manejo.

## RESTRIÇÕES

Os objetivos aqui demonstrados são sujeitos à restrições de ordem física (área), operacional, econômica, ambiental e social. Comumente as restrições mais consideradas são de área, de produção ou demanda e regulação.

A restrição de área determina que a soma das áreas da cada prescrição não exceda a área da unidade de manejo. Essa restrição deve estar presente em todos os modelos de regulação da produção florestal.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq A_i$$

em que  $A_i$  = área da  $i$ -ésima unidade de manejo;  $x_{ij}$  é a área associada a  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo.

A restrição de produção volumétrica, também conhecida como de restrição de demanda, visa limitar a produção volumétrica entre limites desejados para atendimento da demanda de consumo. O Consumo referido pode ser atribuído ao atendimento de uma fábrica de celulose, ou planta de carbonização, dentre outras. Esta restrição é dada pela soma da produtividade multiplicada pela área assinalada a essa prescrição em um determinado período do horizonte de planejamento, sendo assim definida.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ijk} x_{ij} \geq Dmin_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$
$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ijk} x_{ij} \leq Dmax_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$

em que  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a área da  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo;  $m$  é o número total de unidades de manejo;  $n$  é número total de alternativas de manejo para a  $i$ -ésima unidade de manejo;  $v_{ijk}$  é o volume ( $m^3$ ) produzido por unidade de área, no período  $k$ , pela  $i$ -ésima unidade de manejo adotando-se a  $j$ -ésima alternativa de manejo;  $Dmin_k$  e  $Dmax_k$  são as demandas volumétricas ( $m^3$ ) mínima e máxima respectivamente, em cada período do horizonte de planejamento.

As restrições que limitam a área de corte colhida anualmente são importantes para balancear o capital, máquinas e mão-de-obra. Áreas aproximadamente iguais

devem ser colhidas todos os anos para evitar que equipamentos e funcionários sejam incrementados ou reduzidos radicalmente em anos consecutivos. A definição do limite máximo e mínimo das áreas de corte é dada por:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_k x_{ij} \geq Amin_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_k x_{ij} \leq Amax_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$

em que  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a área da  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo;  $m$  é o número total de unidades de manejo;  $n$  é número total de alternativas de manejo para a  $i$ -ésima unidade de manejo;  $a_k$  valor 1 se a variável de decisão  $x_{ij}$  apresentar colheita no período  $k$ , valor 0 caso a variável de decisão  $x_{ij}$  não apresentar colheita no período  $k$ ;  $Amin_k$  e  $Amax_k$  representam o somatório das áreas mínimas e máximas disponíveis para colheita, em cada período do horizonte de planejamento.

Os limites máximo e mínimo das áreas a serem reformadas anualmente podem ser assim definidos:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_k x_{ij} \geq Rmin_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_k x_{ij} \leq Rmax_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$

em que  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a área da  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo;  $m$  é o número total de unidades de manejo;  $n$  é número total de alternativas de manejo para a  $i$ -ésima unidade de manejo;  $a_k$  valor 1 se a variável de decisão  $x_{ij}$  apresentar reforma no período  $k$ , valor 0 caso a variável de decisão  $x_{ij}$  não apresentar reforma no período  $k$ ;  $Rmin_k$  e  $Rmax_k$  representam o somatório das áreas disponíveis para reforma mínima e máxima respectivamente, em cada período do horizonte de planejamento.

Restrições que limitam a área de condução anual, área em repouso, áreas em primeira ou segunda rotação, dentre outras restrições operacionais, podem ser definidas para que o modelo represente fielmente as características do empreendimento em questão.

As restrições de regulação impõe uma distribuição ordenada de classes de idades para o estoque final de crescimento:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ijk} \geq \frac{AT}{IR} \{k = 0, 1, \dots, IR\}$$

em que  $x_{ijk}$  é a área da  $i$ -ésima unidade de manejo manejada sobre a  $j$ -ésima alternativa de manejo, as quais terão  $k$  períodos de idade ao final do horizonte de planejamento;  $IR$  representa o número de classe de idade para a floresta regulada; e  $AT$  é a área total da floresta ao final do horizonte de planejamento. Se a floresta for manejada no regime de duas rotações, logo a estrutura de classes de idade ao final do horizonte de planejamento deve contemplar as duas rotações.

### **PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA (PIM)**

Problemas de regulação da produção florestal podem ser formulados, também, empregando programação inteira (PI) ou programação inteira mista (PIM). A formulação de modelos de PIM é simples e pode ser obtida a partir dos modelos de PL com algumas alterações. Na formulação do modelo matemático via PIM algumas variáveis podem assumir valores discretos, sendo que algumas variáveis ou restrições podem assumir valores contínuos. Essa formulação considera que as variáveis de decisão  $x_{ij}$  que no modelo de PL representam a área da  $j$ -ésima prescrição associada a  $i$ -ésima unidade de manejo passa a ter valor binário (0 ou 1), dessa forma se o valor de  $x_{ij}$  for 1 a prescrição será executada, caso seja 0 a prescrição não será executada.

### **FUNÇÃO OBJETIVO**

A função objetivo em modelos de PIM é a mesma da programação linear, com a ressalva que dos valores dos coeficientes serem calculados para toda a área da unidade de manejo e não por hectare como no modelo resolvido por programação linear.

## RESTRIÇÕES

Funções objetivo demonstrados anteriormente são sujeitos a diversas restrições de ordem física, operacional, econômica, ambiental e social, destes estas destacam-se as restrições descritas abaixo.

A restrição de área determina que somente uma prescrição será assinalada a uma determinada unidade de manejo. Essa restrição pode ser descrita como:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

em que; se  $x_{ij}$  assumir valor 1 a  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo.

A restrição de produção volumétrica é dada pela soma da produção total da unidade de manejo multiplicada pelo variável de decisão  $x_{ij}$ . A definição do limite máximo e mínimo de produção é dada pela expressão abaixo.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ijk} x_{ij} \geq Dmin_k \quad \{k = 0,1, \dots, H - 1\}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ijk} x_{ij} \leq Dmax_k \quad \{k = 0,1, \dots, H - 1\}$$

em que  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo;  $m$  é o número total de unidades de manejo;  $n$  é número total de alternativas de manejo para a  $i$ -ésima unidade de manejo;  $V_{ijk}$  é o volume total (m<sup>3</sup>) produzido, no período  $k$ , pela  $i$ -ésima unidade de manejo adotando-se a  $j$ -ésima alternativa de manejo;  $Dmin_k$  e  $Dmax_k$  são as demandas volumétricas (m<sup>3</sup>) mínima e máxima respectivamente, em cada período do horizonte de planejamento.

A definição do limite máximo e mínimo das áreas de corte é dada pela expressão abaixo.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_i a_k x_{ij} \geq Amin_k \quad \{k = 0,1, \dots, H - 1\}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_i a_k x_{ij} \leq Amax_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$

em que  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo;  $m$  é o número total de unidades de manejo;  $n$  é número total de alternativas de manejo para a  $i$ -ésima unidade de manejo;  $a_k$  valor 1 se a variável de decisão  $x_{ij}$  apresentar colheita no período  $k$ , valor 0 caso a variável de decisão  $x_{ij}$  não apresentar colheita no período  $k$ ;  $A_i$  é a área da unidade de manejo  $i$ ;  $Amin_k$  e  $Amax_k$  representam o somatório das áreas mínimas e máximas disponíveis para colheita, em cada período do horizonte de planejamento.

As restrições que limitam a área a ser reformada anualmente. A definição do limite máximo e mínimo das áreas de reformadas anualmente é dada pela expressão abaixo.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_i a_k x_{ij} \geq Rmin_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_i a_k x_{ij} \leq Rmax_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$

em que  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a  $j$ -ésima alternativa de manejo adotada na  $i$ -ésima unidade de manejo;  $m$  é o número total de unidades de manejo;  $n$  é número total de alternativas de manejo para a  $i$ -ésima unidade de manejo;  $a_k$  valor 1 se a variável de decisão  $x_{ij}$  apresentar reforma no período  $k$ , valor 0 caso a variável de decisão  $x_{ij}$  não apresentar reforma no período  $k$ ;  $A_i$  é a área da unidade de manejo  $i$ ;  $Rmin_k$  e  $Rmax_k$  representam o somatório das áreas mínima e máxima disponíveis para reforma, em cada período do horizonte de planejamento.

As restrições de regulação impõe uma distribuição ordenada de classes de idades para o estoque final de crescimento.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_i x_{ijk} \geq \frac{AT}{IR} \quad \{k = 0, 1, \dots, IR\}$$

em que  $x_{ijk}$  é o valor  $i$ -ésima unidade de manejo manejada sobre a  $j$ -ésima alternativa de manejo, as quais terão  $k$  períodos de idade ao final do horizonte de planejamento;  $A_i$  é a área da unidade de manejo  $i$ ;  $IR$  representa o número de classe de idade para a floresta regulada; e  $AT$  é a área total da floresta ao final do horizonte de planejamento. Se a

floresta for manejada no regime de duas rotações, a estrutura de classes de idade ao final do horizonte de planejamento deve contemplar as duas rotações.

## CASOS DE USO

Para uma melhor apresentação do projeto RPF, foram idealizados cinco casos de uso contendo diferentes situações e cenários a serem modelados e avaliados.

## FAZENDA MODELO

A fazenda modelo 1 representa uma pequena empresa florestal voltada a produção de cavacos. A área total da fazenda é de 3.746 hectares, distribuídos em 120 unidades de manejo. A área média de cada unidade de manejo é de 31 hectares e a idade regulatória adotada é de seis anos. O horizonte de planejamento utilizado é de 18 anos e a taxa de descontos de 10 % ao ano. A distribuição Inicial de classes de idade é apresentada na Figura 1 e o cadastro desta fazenda encontra-se na Tabela 1.

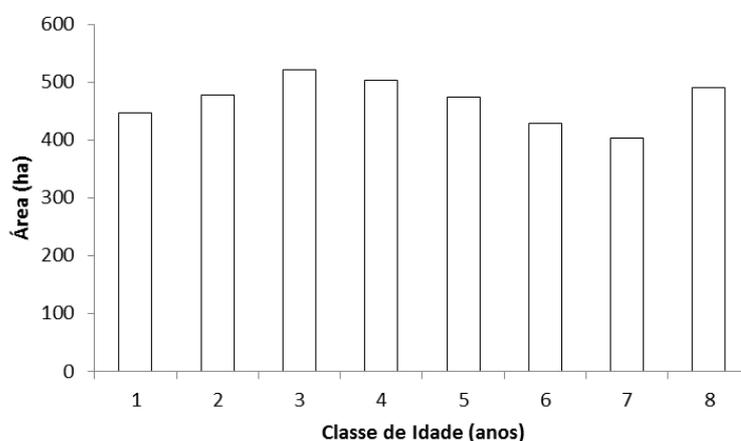


Figura 1: Distribuição inicial de classes de idade encontrada na Fazenda Modelo 1.

As colunas referentes a *Tabela de Custo de Silvicultura*; *Tabela de Custo Acumulado*, *Tabela de Custo de Transporte*; *Tabela de Custo de Colheita*; *Tabela de Produção Volumétrica*, referem-se as chaves para as tabelas de custo de silvicultura, custo acumulado, custo de transporte, custo de colheita, e as tabelas de produção volumétrica respectivamente, essa forma reflete a entrada inicial de dados utilizada pelo RPF.

Tabela 1: Cadastro com a situação inicial das unidades de manejo de uma fazenda modelo de 3746 ha.

Região	Fazenda	Unidade de Manejo	Idade (anos)	Área (ha)	Rotação	Tabela de Custo de Silvicultura	Tabela de Custo Acumulado	Tabela de Custo de Transporte	Tabela de Custo de Colheita	Tabela de Produção Volumétrica	Distância	Situação
A	Jacutinga	1	1	16	1	1	1	1	1	1	11	1R
A	Jacutinga	2	2	29	1	1	2	2	1	1	25	2R
A	Jacutinga	3	3	43	1	1	3	3	1	1	23	3R
A	Jacutinga	4	4	45	1	1	4	4	1	1	18	4R
A	Jacutinga	5	5	29	1	1	5	5	1	1	10	5R
A	Jacutinga	6	6	39	1	1	6	6	1	1	12	6R
A	Jacutinga	7	7	18	1	1	7	7	1	1	32	7R
A	Jacutinga	8	8	36	1	1	8	8	1	1	35	8R
A	Jacutinga	9	1	27	1	1	9	9	1	1	34	1R
A	Jacutinga	10	2	23	1	1	10	10	1	1	14	2R
A	Jacutinga	11	3	36	1	1	11	11	1	1	22	3R
A	Jacutinga	12	4	31	1	1	12	12	1	1	17	4R
A	Jacutinga	13	5	34	1	1	13	13	1	1	10	5R
A	Jacutinga	14	6	41	1	1	14	14	1	1	9	6R
A	Jacutinga	15	7	26	1	1	15	15	1	1	15	7R
A	Jacutinga	16	8	19	1	1	16	16	1	1	34	8R
A	Jacutinga	17	1	33	1	1	17	17	1	1	18	1R
A	Jacutinga	18	2	35	1	1	18	18	1	1	19	2R
A	Jacutinga	19	3	30	1	1	19	19	1	1	26	3R
A	Jacutinga	20	4	36	1	1	20	20	1	1	35	4R
A	SantaMaria	1	8	18	1	1	21	21	1	2	32	8R
A	SantaMaria	2	1	27	1	1	22	22	1	2	22	1R
A	SantaMaria	3	2	36	1	1	23	23	1	2	38	2R

Continua...

Tabela 1. Continuação...

Região	Fazenda	Unidade de Manejo	Idade (anos)	Área (ha)	Rotação	Tabela de Custo de Silvicultura	Tabela de Custo Acumulado	Tabela de Custo de Transporte	Tabela de Custo de Colheita	Tabela de Produção Volumétrica	Distância	Situação
A	SantaMaria	4	3	44	1	1	24	24	1	2	23	3R
A	SantaMaria	5	4	20	1	1	25	25	1	2	38	4R
A	SantaMaria	6	5	15	1	1	26	26	1	2	12	5R
A	SantaMaria	7	6	18	1	1	27	27	1	2	30	6R
A	SantaMaria	8	7	33	1	1	28	28	1	2	21	7R
A	SantaMaria	9	8	44	1	1	29	29	1	2	16	8R
A	SantaMaria	10	1	43	1	1	30	30	1	2	37	1R
A	SantaMaria	11	2	28	1	1	31	31	1	2	5	2R
A	SantaMaria	12	3	15	1	1	32	32	1	2	24	3R
A	SantaMaria	13	4	44	1	1	33	33	1	2	21	4R
A	SantaMaria	14	5	41	1	1	34	34	1	2	13	5R
A	SantaMaria	15	6	18	1	1	35	35	1	2	21	6R
A	SantaMaria	16	7	18	1	1	36	36	1	2	35	7R
A	SantaMaria	17	8	41	1	1	37	37	1	2	19	8R
A	SantaMaria	18	1	35	1	1	38	38	1	2	8	1R
A	SantaMaria	19	2	16	1	1	39	39	1	2	7	2R
A	SantaMaria	20	3	25	1	1	40	40	1	2	39	3R
B	BoaSorte	1	7	20	1	2	41	41	2	3	31	7R
B	BoaSorte	2	8	34	1	2	42	42	2	3	9	8R
B	BoaSorte	3	1	36	1	2	43	43	2	3	16	1R
B	BoaSorte	4	2	30	1	2	44	44	2	3	22	2R
B	BoaSorte	5	3	26	1	2	45	45	2	3	12	3R
B	BoaSorte	6	4	29	1	2	46	46	2	3	37	4R
B	BoaSorte	7	5	25	1	2	47	47	2	3	17	5R
B	BoaSorte	8	6	39	1	2	48	48	2	3	34	6R

Continua...

Tabela 1. Continuação...

Região	Fazenda	Unidade de Manejo	Idade (anos)	Área (ha)	Rotação	Tabela de Custo de Silvicultura	Tabela de Custo Acumulado	Tabela de Custo de Transporte	Tabela de Custo de Colheita	Tabela de Produção Volumétrica	Distância	Situação
B	BoaSorte	9	7	34	1	2	49	49	2	3	7	7R
B	BoaSorte	10	8	22	1	2	50	50	2	3	34	8R
B	BoaSorte	11	1	33	1	2	51	51	2	3	15	1R
B	BoaSorte	12	2	31	1	2	52	52	2	3	33	2R
B	BoaSorte	13	3	43	1	2	53	53	2	3	10	3R
B	BoaSorte	14	4	30	1	2	54	54	2	3	9	4R
B	BoaSorte	15	5	32	1	2	55	55	2	3	23	5R
B	BoaSorte	16	6	25	1	2	56	56	2	3	40	6R
B	BoaSorte	17	7	20	1	2	57	57	2	3	8	7R
B	BoaSorte	18	8	28	1	2	58	58	2	3	37	8R
B	BoaSorte	19	1	19	1	2	59	59	2	3	29	1R
B	BoaSorte	20	2	32	1	2	60	60	2	3	33	2R
B	Providencia	1	5	17	1	2	61	61	2	4	30	5R
B	Providencia	2	6	21	1	2	62	62	2	4	15	6R
B	Providencia	3	7	37	1	2	63	63	2	4	36	7R
B	Providencia	4	8	33	1	2	64	64	2	4	19	8R
B	Providencia	5	1	25	1	2	65	65	2	4	19	1R
B	Providencia	6	2	32	1	2	66	66	2	4	9	2R
B	Providencia	7	3	32	1	2	67	67	2	4	29	3R
B	Providencia	8	4	23	1	2	68	68	2	4	34	4R
B	Providencia	9	5	41	1	2	69	69	2	4	23	5R
B	Providencia	10	6	28	1	2	70	70	2	4	9	6R
B	Providencia	11	7	45	1	2	71	71	2	4	13	7R
B	Providencia	12	8	42	1	2	72	72	2	4	28	8R
B	Providencia	13	1	35	1	2	73	73	2	4	31	1R

Continua...

Tabela 1. Continuação...

Região	Fazenda	Unidade de Manejo	Idade (anos)	Área (ha)	Rotação	Tabela de Custo de Silvicultura	Tabela de Custo Acumulado	Tabela de Custo de Transporte	Tabela de Custo de Colheita	Tabela de Produção Volumétrica	Distância	Situação
B	Providencia	14	2	29	1	2	74	74	2	4	20	2R
B	Providencia	15	3	35	1	2	75	75	2	4	18	3R
B	Providencia	16	4	32	1	2	76	76	2	4	27	4R
B	Providencia	17	5	41	1	2	77	77	2	4	18	5R
B	Providencia	18	6	32	1	2	78	78	2	4	32	6R
B	Providencia	19	7	32	1	2	79	79	2	4	26	7R
B	Providencia	20	8	41	1	2	80	80	2	4	14	8R
B	SantaCruz	1	3	41	1	2	81	81	2	5	39	3R
B	SantaCruz	2	4	40	1	2	82	82	2	5	30	4R
B	SantaCruz	3	5	40	1	2	83	83	2	5	37	5R
B	SantaCruz	4	6	42	1	2	84	84	2	5	23	6R
B	SantaCruz	5	7	17	1	2	85	85	2	5	34	7R
B	SantaCruz	6	8	25	1	2	86	86	2	5	35	8R
B	SantaCruz	7	1	22	1	2	87	87	2	5	34	1R
B	SantaCruz	8	2	38	1	2	88	88	2	5	38	2R
B	SantaCruz	9	3	26	1	2	89	89	2	5	32	3R
B	SantaCruz	10	4	39	1	2	90	90	2	5	35	4R
B	SantaCruz	11	5	28	1	2	91	91	2	5	33	5R
B	SantaCruz	12	6	33	1	2	92	92	2	5	12	6R
B	SantaCruz	13	7	43	1	2	93	93	2	5	7	7R
B	SantaCruz	14	8	39	1	2	94	94	2	5	14	8R
B	SantaCruz	15	1	38	1	2	95	95	2	5	7	1R
B	SantaCruz	16	2	21	1	2	96	96	2	5	34	2R
B	SantaCruz	17	3	42	1	2	97	97	2	5	35	3R
B	SantaCruz	18	4	40	1	2	98	98	2	5	16	4R

Continua...

Tabela 1. Continuação...

Região	Fazenda	Unidade de Manejo	Idade (anos)	Área (ha)	Rotação	Tabela de Custo de Silvicultura	Tabela de Custo Acumulado	Tabela de Custo de Transporte	Tabela de Custo de Colheita	Tabela de Produção Volumétrica	Distância	Situação
B	SantaCruz	19	5	39	1	2	99	99	2	5	28	5R
B	SantaCruz	20	6	34	1	2	100	100	2	5	13	6R
C	Fazenda Velha	1	2	31	1	3	101	101	3	6	29	2R
C	Fazenda Velha	2	3	39	1	3	102	102	3	6	13	3R
C	Fazenda Velha	3	4	40	1	3	103	103	3	6	19	4R
C	Fazenda Velha	4	5	33	1	3	104	104	3	6	5	5R
C	Fazenda Velha	5	6	32	1	3	105	105	3	6	21	6R
C	Fazenda Velha	6	7	43	1	3	106	106	3	6	25	7R
C	Fazenda Velha	7	8	27	1	3	107	107	3	6	11	8R
C	Fazenda Velha	8	1	33	1	3	108	108	3	6	34	1R
C	Fazenda Velha	9	2	43	1	3	109	109	3	6	25	2R
C	Fazenda Velha	10	3	29	1	3	110	110	3	6	9	3R
C	Fazenda Velha	11	4	32	1	3	111	111	3	6	22	4R
C	Fazenda Velha	12	5	26	1	3	112	112	3	6	18	5R
C	Fazenda Velha	13	6	27	1	3	113	113	3	6	30	6R
C	Fazenda Velha	14	7	18	1	3	114	114	3	6	20	7R
C	Fazenda Velha	15	8	42	1	3	115	115	3	6	12	8R
C	Fazenda Velha	16	1	24	1	3	116	116	3	6	19	1R
C	Fazenda Velha	17	2	23	1	3	117	117	3	6	8	2R
C	Fazenda Velha	18	3	15	1	3	118	118	3	6	40	3R
C	Fazenda Velha	19	4	23	1	3	119	119	3	6	15	4R
C	Fazenda Velha	20	5	33	1	3	120	120	3	6	28	5R

## ESTADOS

Os estados nos quais são encontradas as unidades de manejo caracterizam sua situação atual, bem como as alterações que estas acarretam no estado da unidade de manejo. Um resumo dos estados usados nesse trabalho é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Estados existentes e influencias nas unidades de manejo.

Estados	Descrição	Idade	Produção	Rotação	Venda de Terra
1R	Idade 1 ano em 1 Rotação	N	N	N	N
2R	Idade 2 ano em 1 Rotação	N	N	N	N
3R	Idade 3 ano em 1 Rotação	N	N	N	N
4R	Idade 4 ano em 1 Rotação	N	N	N	N
5R	Idade 5 ano em 1 Rotação	N	N	N	N
6R	Idade 6 ano em 1 Rotação	N	N	N	N
7R	Idade 7 ano em 1 Rotação	N	N	N	N
8R	Idade 8 ano em 1 Rotação	N	N	N	N
9R	Idade 9 ano em 1 Rotação	N	N	N	N
CR	Ação de Corte e Reforma	S	S	1	N
C	Ação de Corte	0	S	N	N
R	Ação de Reforma	S	N	1	N
CT	Ação de Corte e Condução	S	S	S	N
1T	Idade 1 ano em 2 Rotação	N	N	N	N
2T	Idade 2 ano em 2 Rotação	N	N	N	N
3T	Idade 3 ano em 2 Rotação	N	N	N	N
4T	Idade 4 ano em 2 Rotação	N	N	N	N
5T	Idade 5 ano em 2 Rotação	N	N	N	N
6T	Idade 6 ano em 2 Rotação	N	N	N	N
7T	Idade 7 ano em 2 Rotação	N	N	N	N
8T	Idade 8 ano em 2 Rotação	N	N	N	N
CV	Corte e venda de Terra	0	S	N	S

A Coluna *Idade* da Tabela 2 é responsável pelas alterações na idade das unidades de manejo. Caso seu valor seja *N*, a idade da unidade de manejo seja incrementada em 1 ano, caso seu valor seja *S*, a idade da unidade de manejo terá valor de 1 ano, caso 0 o valor da idade será 0. A coluna *Produção* representa a ocorrência de colheita, caso *S* a situação oferece colheita, caso *N* não ocorre

produção. A coluna *Rotação* representa as alterações ocorridas na rotação, caso apresente valor N a rotação não é alterada, caso S, a rotação é incrementada e caso 1 a rotação passa a ter valor 1. A coluna *Venda de Terra* representa se a situação atual acarreta venda de terra, caso apresente valor S a unidade de manejo será vendida, caso N não.

## CUSTO DE SILVICULTURA

As tabelas de custos são associadas às situações nas quais as unidades de manejo se encontram (Tabela 3).

Tabela 3: Tabelas de custos de silvicultura utilizadas nesse trabalho.

Custo	Estado	Valor (R\$/ha)
1	1R	500
1	1T	300
1	2R	200
1	2T	100
1	3R	100
1	3T	100
1	4R	100
1	4T	100
1	5R	100
1	5T	100
1	6R	100
1	6T	100
1	7R	100
1	7T	100
1	8R	100
1	8T	100
1	9R	100
1	9T	100
1	CR	2500
1	CT	1500
1	R	2500
1	C	0
2	1R	650
2	1T	530
2	2R	95
2	2T	95
2	3R	95
2	3T	95

Custo	Estado	Valor (R\$/ha)
2	4R	95
2	4T	95
2	5R	95
2	5T	95
2	6R	95
2	6T	95
2	7R	95
2	7T	95
2	8R	95
2	8T	95
2	9R	95
2	9T	95
2	CR	2800
2	CT	1200
2	R	2800
2	C	50
3	1R	610
3	1T	500
3	2R	120
3	2T	120
3	3R	120
3	3T	120
3	4R	120
3	4T	120
3	5R	120
3	5T	120
3	6R	120
3	6T	120
3	7R	120
3	7T	120
3	8R	120
3	8T	120
3	9R	120
3	9T	120
3	CR	3200
3	CT	1300
3	R	3200
3	C	35

## CUSTO ACUMULADO

Essas tabelas representam os custos ocorridos antes do início do horizonte de planejamento, ou seja, todo o capital imobilizado em cada unidade de manejo. A tabela 4 contém os custos acumulados da fazenda modelo em estudo.

Tabela 4: Custo acumulado da fazenda modelo.

Custo Acumulado	Valor (R\$/ha)	Custo Acumulado	Valor (R\$/ha)	Custo Acumulado	Valor (R\$/ha)
1	3032	41	159	81	212
2	416	42	151	82	236
3	170	43	3051	83	237
4	130	44	425	84	219
5	231	45	190	85	113
6	170	46	202	86	102
7	234	47	155	87	3065
8	172	48	126	88	429
9	3065	49	226	89	102
10	419	50	192	90	121
11	187	51	3064	91	140
12	122	52	520	92	209
13	197	53	165	93	215
14	231	54	156	94	218
15	143	55	195	95	3050
16	186	56	110	96	507
17	3091	57	208	97	148
18	511	58	183	98	176
19	163	59	3107	99	200
20	126	60	451	100	213
21	233	61	118	101	489
22	3120	62	138	102	188
23	460	63	168	103	112
24	214	64	137	104	159
25	191	65	3029	105	236
26	195	66	495	106	176
27	127	67	149	107	122
28	133	68	189	108	3116
29	188	69	181	109	458
30	3083	70	220	110	167
31	526	71	152	111	191
32	105	72	142	112	173
33	152	73	3122	113	211
34	206	74	509	114	136

Custo Acumulado	Valor (R\$/ha)	Custo Acumulado	Valor (R\$/ha)	Custo Acumulado	Valor (R\$/ha)
35	123	75	238	115	238
36	207	76	191	116	3005
37	231	77	184	117	511
38	3093	78	239	118	201
39	530	79	196	119	155
40	194	80	222	120	133

## CUSTO DE TRANSPORTE

As tabelas de custos de transporte apresentam um custo individual para cada unidade de manejo (Tabela 5).

Tabela 5: Custo de transporte para a fazenda modelo.

Custo de Transporte	R\$/m³/km	Custo de Transporte	R\$/m³/km	Custo de Transporte	R\$/m³/km
1	0,75697	41	1,43641	81	1,67665
2	1,14380	42	0,37981	82	1,10507
3	0,57846	43	0,28072	83	0,75686
4	0,94387	44	0,94862	84	1,03116
5	0,63802	45	0,53121	85	1,16747
6	1,09738	46	1,05434	86	0,95539
7	0,17997	47	1,49159	87	0,98489
8	1,34622	48	0,48207	88	0,51292
9	0,38118	49	0,62793	89	0,88411
10	0,56158	50	1,47048	90	1,21184
11	0,57008	51	0,68748	91	1,70010
12	0,81165	52	0,79413	92	0,63543
13	0,85206	53	0,81439	93	1,19308
14	1,13887	54	0,84348	94	0,65759
15	0,61736	55	1,13661	95	1,61938
16	1,03996	56	0,48940	96	0,96843
17	0,40221	57	0,81300	97	0,68878
18	0,25412	58	1,06977	98	0,76996
19	0,88392	59	0,79972	99	0,89829
20	1,21564	60	0,96205	100	1,29856
21	1,23146	61	0,77622	101	0,94896
22	0,81567	62	1,42505	102	0,83662
23	0,68050	63	0,99441	103	0,36741
24	1,85448	64	1,25165	104	1,10519
25	0,96148	65	1,53374	105	0,74479
26	0,60335	66	1,87858	106	1,34274

Custo de Transporte	R\$/m <sup>3</sup> /km	Custo de Transporte	R\$/m <sup>3</sup> /km	Custo de Transporte	R\$/m <sup>3</sup> /km
27	0,70962	67	1,29478	107	1,61080
28	1,57515	68	0,40715	108	1,67475
29	0,63124	69	0,37790	109	1,13389
30	0,11304	70	1,42398	110	0,38560
31	1,21719	71	0,71359	111	0,57866
32	1,74074	72	0,82895	112	0,93642
33	0,56061	73	1,31611	113	0,25115
34	1,64681	74	1,23333	114	1,19509
35	1,31565	75	1,70025	115	0,82971
36	1,08407	76	0,88953	116	1,78451
37	1,01895	77	0,72281	117	0,49328
38	0,40981	78	0,99780	118	1,38039
39	1,08893	79	0,44369	119	0,89513
40	0,58221	80	0,43038	120	0,53990

## CUSTO DE COLHEITA

As tabelas de custo de colheita apresentam valores diferenciados quanto a rotação e classe de produtividade (Tabela 6).

Tabela 6: Custo colheita utilizados para a fazenda modelo.

Custo	Classe	Limite Mínimo de Produtividade	Limite Máximo de Produtividade	Valor (R\$/m <sup>3</sup> )
1	1	0	50	26
1	2	50	100	24
1	3	100	150	21
1	4	150	200	21
1	5	200	250	20
1	6	250	300	20
1	7	300	350	18
1	8	350	600	18
2	1	0	50	26
2	2	50	100	24
2	3	100	150	21
2	4	150	200	22
2	5	200	250	20
2	6	250	300	20
2	7	300	350	19
2	8	350	600	17
3	1	0	50	26
3	2	50	100	24

3	3	100	150	22
3	4	150	200	22
3	5	200	250	20
3	6	250	300	19
3	7	300	350	18
3	8	350	600	18

## PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA

As estimativas de produção utilizadas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Tabelas de produção utilizadas na fazenda modelo.

Tabelas de Produção	Rotação	Idade	Volume (m <sup>3</sup> /ha)
1	1	1	18,78
1	1	2	78,06
1	1	3	206,32
1	1	4	305,04
1	1	5	336,78
1	1	6	343,83
1	1	7	345,25
1	1	8	345,53
1	1	9	345,59
1	1	10	345,60
1	2	1	17,84
1	2	2	74,15
1	2	3	196,00
1	2	4	289,79
1	2	5	319,94
1	2	6	326,64
1	2	7	327,99
1	2	8	328,26
1	2	9	328,31
1	2	10	328,32
2	1	1	50,77
2	1	2	76,11
2	1	3	111,78
2	1	4	159,56
2	1	5	219,55
2	1	6	289,01
2	1	7	362,25
2	1	8	432,26
2	1	9	493,19
2	1	10	542,02

---

2	2	1	48,23
2	2	2	72,31
2	2	3	106,19
2	2	4	151,58
2	2	5	208,58
2	2	6	274,56
2	2	7	344,13
2	2	8	410,65
2	2	9	468,53
2	2	10	514,92
3	1	1	71,10
3	1	2	97,87
3	1	3	132,34
3	1	4	174,99
3	1	5	225,19
3	1	6	280,96
3	1	7	339,05
3	1	8	395,64
3	1	9	447,29
3	1	10	491,71
3	2	1	67,54
3	2	2	92,98
3	2	3	125,73
3	2	4	166,24
3	2	5	213,93
3	2	6	266,91
3	2	7	322,10
3	2	8	375,86
3	2	9	424,93
3	2	10	467,12
4	1	1	78,34
4	1	2	117,00
4	1	3	169,49
4	1	4	235,95
4	1	5	312,99
4	1	6	393,69
4	1	7	469,71
4	1	8	534,51
4	1	9	585,18
4	1	10	622,21
4	2	1	74,43
4	2	2	111,15
4	2	3	161,02
4	2	4	224,15
4	2	5	297,34
4	2	6	374,00

---

---

4	2	7	446,23
4	2	8	507,78
4	2	9	555,92
4	2	10	591,10
5	1	1	46,67
5	1	2	94,44
5	1	3	171,70
5	1	4	268,12
5	1	5	355,99
5	1	6	415,90
5	1	7	449,12
5	1	8	465,47
5	1	9	473,03
5	1	10	476,44
5	2	1	44,33
5	2	2	89,72
5	2	3	163,12
5	2	4	254,72
5	2	5	338,19
5	2	6	395,11
5	2	7	426,67
5	2	8	442,19
5	2	9	449,38
5	2	10	452,61
6	1	1	27,95
6	1	2	70,74
6	1	3	157,95
6	1	4	284,35
6	1	5	399,69
6	1	6	468,17
6	1	7	499,00
6	1	8	511,14
6	1	9	515,66
6	1	10	517,31
6	2	1	26,55
6	2	2	67,20
6	2	3	150,05
6	2	4	270,13
6	2	5	379,71
6	2	6	444,76
6	2	7	474,05
6	2	8	485,58
6	2	9	489,88
6	2	10	491,45

---

O preço considerado para a venda madeira foi de R\$ 80,00 /m<sup>3</sup>, e de R\$ 40,00 /m<sup>3</sup> para o estoque de crescimento. O valor da venda de terras foi atribuído como R\$ 3000/ha.

## **SIMULAÇÕES**

Foram considerados cinco cenários de situações comumente encontradas na área florestal. No Cenário 1 o manejo adotado para a fazenda modelo contemplou somente o corte seguido de reforma imediata da área. A idade de corte permitida variou entre 5 e 9 anos e o objetivo foi a maximização do Valor Presente Líquido Global. A produção total foi limitada entre 180000 e 250000 m<sup>3</sup> por ano.

No cenário 2 foi considerada a possibilidade de condução da brotação (talhadia). A idade de corte permitida variou entre 6 e 9 e o objetivo foi a minimização do custo total. Foi imposta a restrição de que a área de condução não poderia ser superior a 200 hectares por ano.

O cenário 3 apresentou como alternativas de manejo o corte seguido de reforma imediata da área, corte e condução da área via talhadia, e corte com reforma no próximo ano. A idade de corte permitida variou entre 6 e 9 anos de idade. O objetivo principal desse cenário é a minimização do custo médio de produção e a restrição de que a área de corte anual, em cada região, deveria ser maior do que 100 hectares.

O cenário 4 apresentou a mesma prescrição do cenário 3, com o objetivo de maximização da produção global, considerando que a produção em cada fazenda deve ser maior do que 2000 m<sup>3</sup> por período. A idade de corte permitida variou entre 6 e 9 anos de idade na primeira rotação(alto fuste) e entre 6 e 8 para a segunda rotação (talhadia).

Finalmente foi considerado um cenário 5 contemplando somente o corte (entre 6 a 9 anos) seguido de reforma imediata da área, visando a maximização do Valor Presente Líquido Global, com a restrição de que a produção total fosse limitada entre 180.000 e 250.000 m<sup>3</sup> por ano. Aqui somente uma prescrição deve ser atribuída a cada unidade de manejo.

## RESULTADOS

O sistema computacional denominado por RPF (Regulação da Produção Florestal) foi desenvolvido visando obter uma interface mais amigável possível para os usuários, admitindo certa flexibilidade na simulação de cenários e uma ampla visualização do processo matemático necessário para a geração dos modelos matemáticos de regulação da produção (Figura 2).

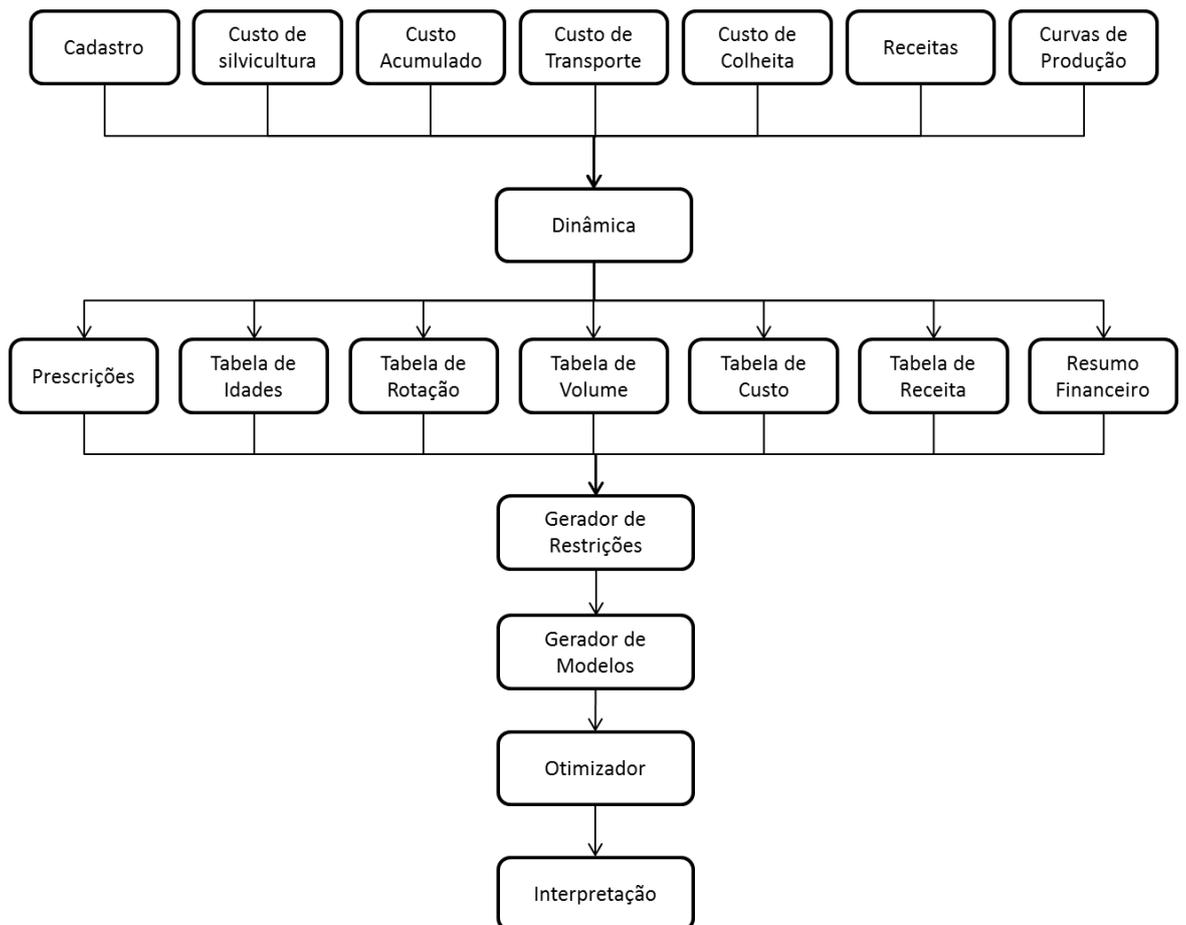


Figura 2: Estrutura básica do sistema RPF.

A tela inicial do RPF é apresentada na Figura 3. No menu Arquivo a estrutura completa dos modelos formulados, bem como os dados utilizados podem ser salvos ou editados.

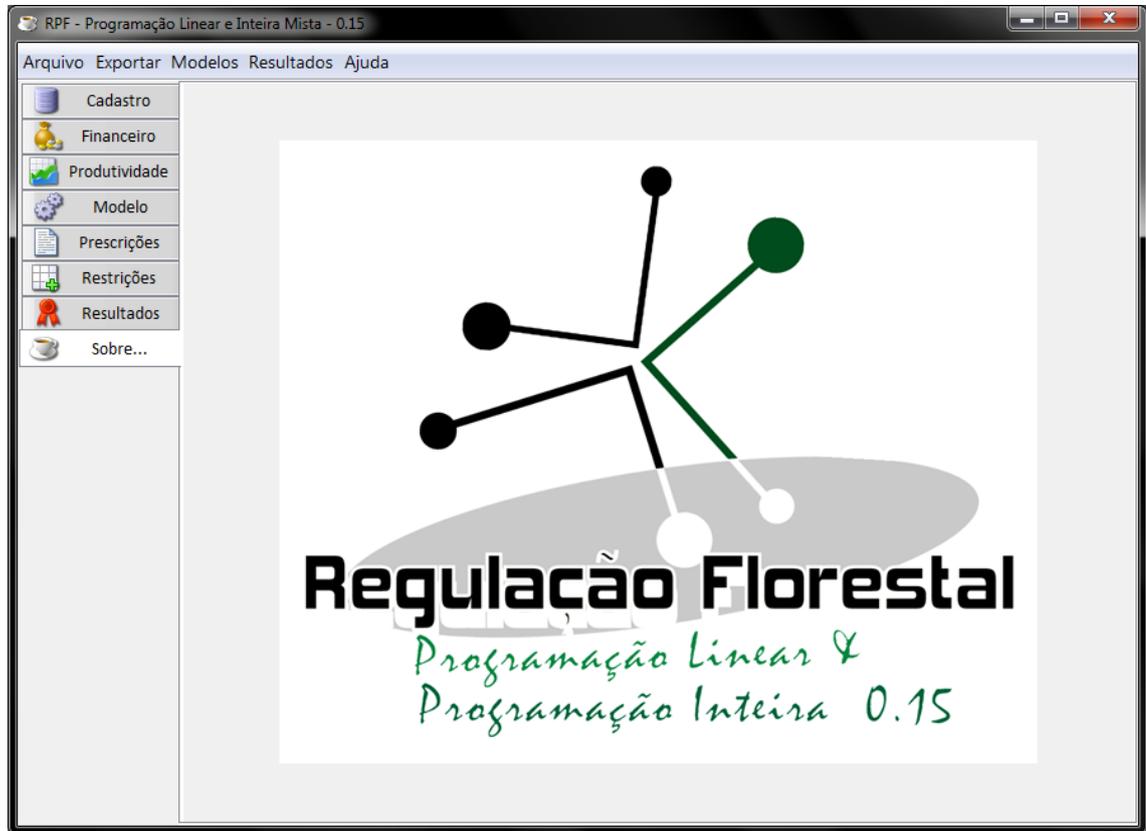


Figura 3: Tela inicial do sistema RPF.

## ENTRADA DE DADOS E INFORMAÇÕES

### CADASTRO

As informações básicas relacionadas as unidades de manejo são inseridas na aba Cadastro (Figura 4). As informações necessárias são Região, Fazenda, Número da Unidade de Manejo, Idade em anos, Área em hectares, Rotação, Índice da Tabela de Custo de Silvicultura, Índice da Tabela de Custo Acumulado, Índice da Tabela de Custo de Transporte, Índice da Tabela de Custo de Colheita, Índice da Tabela de Produção Volumétrica, Distância entre a Unidade de Manejo e o ponto de entrega da madeira, Situação atual da unidade de manejo.

RPF - Programação Linear e Inteira Mista - 0.15

Arquivo Exportar Modelos Resultados Ajuda

Cadastro Importar Cadastro Adicionar Registro Deletar Registro Salvar Cadastro

	Região	Fazenda	Unidade de Manejo	Idade	Área	Rotação	Custo Silvicultura	Custo Acumulado	Custo Transporte	Custo Colheita	Curva de Volume	Distância	Situação
Financieiro	A	Jacutinga	1	1	16	1	1	1	1	1	1	11	1R
Produtividade	A	Jacutinga	2	2	29	1	1	2	1	1	1	25	2R
Modelo	A	Jacutinga	3	3	43	1	1	3	3	1	1	23	3R
Prescrições	A	Jacutinga	4	4	45	1	1	4	4	1	1	18	4R
Restrições	A	Jacutinga	5	5	29	1	1	5	5	1	1	10	5R
Resultados	A	Jacutinga	6	6	39	1	1	6	6	1	1	12	6R
Sobre...	A	Jacutinga	7	7	18	1	1	7	7	1	1	32	7R
	A	Jacutinga	8	8	36	1	1	8	8	1	1	35	8R
	A	Jacutinga	9	1	27	1	1	9	9	1	1	34	1R
	A	Jacutinga	10	2	23	1	1	10	10	1	1	14	2R
	A	Jacutinga	11	3	36	1	1	11	11	1	1	22	3R
	A	Jacutinga	12	4	31	1	1	12	12	1	1	17	4R
	A	Jacutinga	13	5	34	1	1	13	13	1	1	10	5R
	A	Jacutinga	14	6	41	1	1	14	14	1	1	9	6R
	A	Jacutinga	15	7	26	1	1	15	15	1	1	15	7R
	A	Jacutinga	16	8	19	1	1	16	16	1	1	34	8R
	A	Jacutinga	17	1	33	1	1	17	17	1	1	18	1R
	A	Jacutinga	18	2	35	1	1	18	18	1	1	19	2R
	A	Jacutinga	19	3	30	1	1	19	19	1	1	26	3R
	A	Jacutinga	20	4	36	1	1	20	20	1	1	35	4R
	A	SantaMaria	1	8	18	1	1	21	21	1	2	32	8R
	A	SantaMaria	2	1	27	1	1	22	22	1	2	22	1R
	A	SantaMaria	3	2	36	1	1	23	23	1	2	38	2R
	A	SantaMaria	4	3	44	1	1	24	24	1	2	23	3R
	A	SantaMaria	5	4	20	1	1	25	25	1	2	38	4R
	A	SantaMaria	6	5	15	1	1	26	26	1	2	12	5R
	A	SantaMaria	7	6	18	1	1	27	27	1	2	30	6R
	A	SantaMaria	8	7	33	1	1	28	28	1	2	21	7R
	A	SantaMaria	9	8	44	1	1	29	29	1	2	16	8R
	A	SantaMaria	10	1	43	1	1	30	30	1	2	37	1R
	A	SantaMaria	11	2	28	1	1	31	31	1	2	5	2R
	A	SantaMaria	12	3	15	1	1	32	32	1	2	24	3R
	A	SantaMaria	13	4	44	1	1	33	33	1	2	21	4R
	A	SantaMaria	14	5	41	1	1	34	34	1	2	13	5R
	A	SantaMaria	15	6	18	1	1	35	35	1	2	21	6R
	A	SantaMaria	16	7	18	1	1	36	36	1	2	35	7R

Figura 4: Tela de cadastro das Unidades de Manejo.

## FINANCEIRO

Os custos incidentes nas atividades florestais são divididos em: Custo de silvicultura; Custo acumulado; Custo de transporte; e Custo de colheita. As tabelas de entradas de dados são apresentadas nas Figuras 5, 6, 7 e 8.

RPF - Programação Linear e Inteira Mista - 0.15

Arquivo Exportar Modelos Resultados Ajuda

Cadastro    Custo Silvicultura    Custo Acumulado    Custo de Transporte    Custo de Colheita    Receitas

Importar Curvas de Custo    Adicionar Registro    Deletar Registro    Salvar Curvas de Custo

Índice	Situação	Valor (R\$/ha)
1	1R	700
1	1T	700
1	2R	100
1	2T	100
1	3R	100
1	3T	100
1	4R	100
1	4T	100
1	5R	100
1	5T	100
1	6R	100
1	6T	100
1	7R	100
1	7T	100
1	8R	100
1	8T	100
1	9R	100
1	9T	100
1	COM	2000
1	CR	3000
1	CT	3000
1	R	3000
1	C	0
2	1R	700
2	1T	700
2	2R	100
2	2T	100
2	3R	100
2	3T	100
2	4R	100
2	4T	100

Figura 5: Tabelas de Custo de Silvicultura utilizadas na fazenda modelo.

RPF - Programação Linear e Inteira Mista - 0.15

Arquivo Exportar Modelos Resultados Ajuda

Cadastro    Custo Silvicultura    Custo Acumulado    Custo de Transporte    Custo de Colheita    Receitas

Importar Custo Acumulado    Adicionar Registro    Deletar Registro    Salvar Curvas de Custo

Índice	Valor (R\$/ha)
1	3032
2	416
3	170
4	130
5	231
6	170
7	234
8	172
9	3065
10	419
11	187
12	122
13	197
14	231
15	143
16	186
17	3091
18	511
19	163
20	126
21	233
22	3120
23	460
24	214
25	191
26	195
27	127
28	133
29	188
30	3083
31	526

Figura 6: Tabelas de Custo Acumulado utilizadas na fazenda modelo.

RPF - Programação Linear e Inteira Mista - 0.15

Arquivo Exportar Modelos Resultados Ajuda

Cadastro Custos Silvicultura Custos Acumulados Custos de Transporte Custos de Colheita Receitas

Financeiro Importar Custo Transporte Adicionar Registro Deletar Registro Salvar Curvas de Custo

Índice	Valor (R\$/m³)
1	0.756974847
2	1.143803963
3	0.578465553
4	0.943874988
5	0.638021881
6	1.097385687
7	0.17997286
8	1.346227995
9	0.381184022
10	0.561587547
11	0.570087135
12	0.811651752
13	0.852063837
14	1.138875909
15	0.61736087
16	1.039965257
17	0.402213047
18	0.254125084
19	0.883921913
20	1.215640151
21	1.231467937
22	0.815678676
23	0.680505026
24	1.85448316
25	0.961484066
26	0.603359965
27	0.709622013
28	1.575153058
29	0.631243255
30	0.113048035
31	1.217196626

Figura 7: Tabelas de Custo de Transporte utilizadas na fazenda modelo.

RPF - Programação Linear e Inteira Mista - 0.15

Arquivo Exportar Modelos Resultados Ajuda

Cadastro Custos Silvicultura Custos Acumulados Custos de Transporte Custos de Colheita Receitas

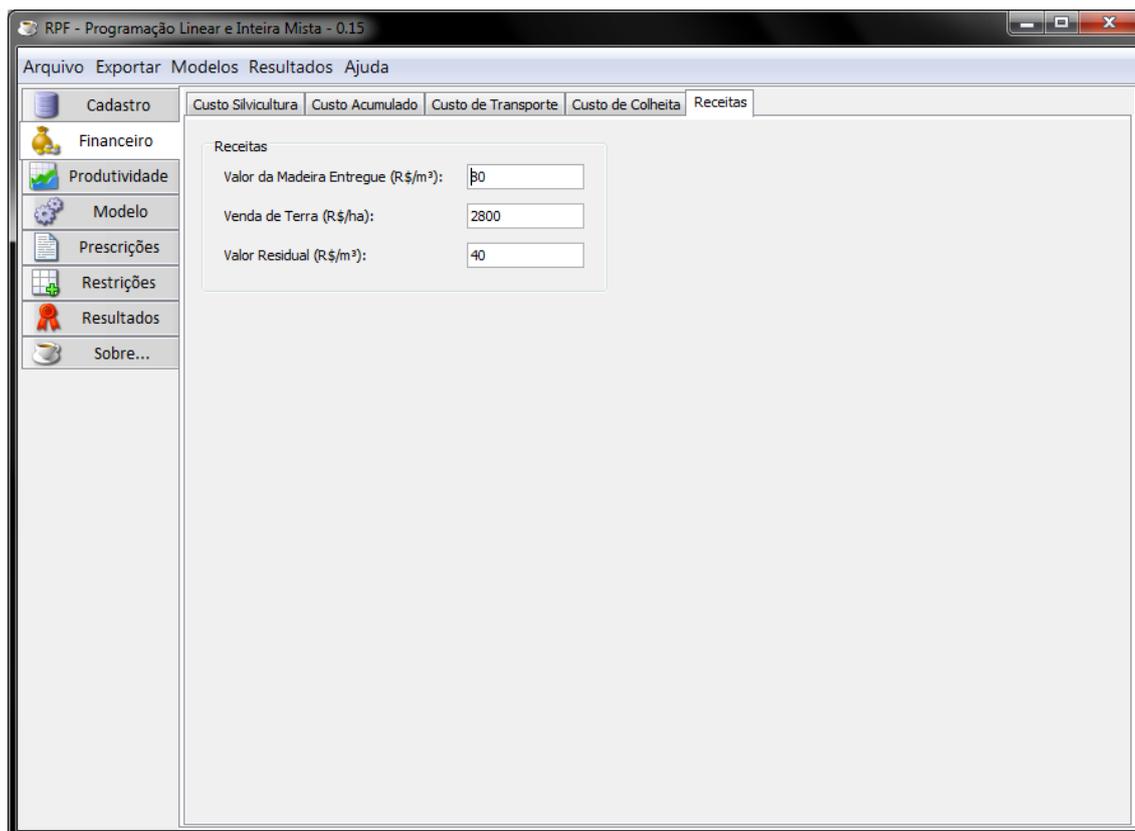
Financeiro Importar Custo de Colheita Adicionar Registro Deletar Registro Salvar Curvas de Custo

Índice	Classe de Custo	Limite Mínimo de Produtividade	Limite Máximo de Produtividade	Valor (R\$/m³)
1	1	0	50	26
1	2	50	100	24
1	3	100	150	21
1	4	150	200	21
1	5	200	250	20
1	6	250	300	20
1	7	300	350	18
1	8	350	400	18
2	1	0	50	26
2	2	50	100	24
2	3	100	150	21
2	4	150	200	22
2	5	200	250	20
2	6	250	300	20
2	7	300	350	19
2	8	350	400	17
3	1	0	50	26
3	2	50	100	24
3	3	100	150	22
3	4	150	200	22
3	5	200	250	20
3	6	250	300	19
3	7	300	350	18
3	8	350	400	18

Figura 8: Tabelas de Custo de Colheita utilizadas na fazenda modelo.

## RECEITAS

O RPF, em sua primeira versão, permite definição de somente um valor para a venda de madeira ou venda de terra, bem como um único valor residual para toda a fazenda, conforme apresentado na Figura 9.



Receitas	
Valor da Madeira Entregue (R\$/m³):	0
Venda de Terra (R\$/ha):	2800
Valor Residual (R\$/m³):	40

Figura 9: Valores de Receitas obtidas na fazenda modelo.

## PRODUTIVIDADE

A tabela de produção armazena produções volumétricas de madeira para cada índice. A estrutura apresentada na Figura 10 é o formato de tabelas, com informações de produção ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) por rotação, idade e índice.

Índice	Rotação	Idade (anos)	Produção (m³/ha)
1	1	1	14,45
1	1	2	60,04
1	1	3	158,71
1	1	4	234,65
1	1	5	259,06
1	1	6	264,48
1	1	7	265,58
1	1	8	265,79
1	1	9	265,84
1	1	10	265,84
1	2	1	13,72
1	2	2	57,04
1	2	3	150,77
1	2	4	222,92
1	2	5	246,11
1	2	6	251,26
1	2	7	252,30
1	2	8	252,50
1	2	9	252,54
1	2	10	252,55
2	1	1	39,05
2	1	2	58,55
2	1	3	85,98
2	1	4	122,74
2	1	5	168,89
2	1	6	222,31
2	1	7	278,65
2	1	8	332,51
2	1	9	379,38
2	1	10	416,94
2	2	1	37,10
2	2	2	55,62
2	2	3	81,68

Figura 10: Formato de *input* das Tabelas de produção utilizadas na fazenda modelo.

## MATRIZ DE MANEJO

Na aba modelo é definida a matriz de transição que gera as prescrições para a formulação matemática do modelo de regulação florestal (Figura 11). A geração das prescrições segue somente ao estado atual da unidade de manejo, a escolha da futura situação da unidade de manejo determina qual serão as alterações no volume, idade, rotação, dentre outras características do modelo. A matriz de transição determina a dinâmica da floresta. É através dela que se defini a amplitude da idade de corte, ou se haverá venda de terra, ou corte seguido de reforma, ou corte com reforma imediata.

Nessa seção são exibidos os possíveis objetivos que podem ser usados no modelo de regulação florestal, os objetivos possíveis são minimização dos custos, minimização do custo médio de produção, maximização da produção e maximização da receita líquida (VPL). Outros parâmetros do modelo como tamanho do horizonte de planejamento, e taxa de juros. A exigência da estrutura regulada é formulada na

seção regulação, onde são definidas a idade regulatória e percentagem de variação permitida para a área regulada. Na seção Descrição dos Códigos são definidos os códigos utilizados, como apresentado na Tabela 2.

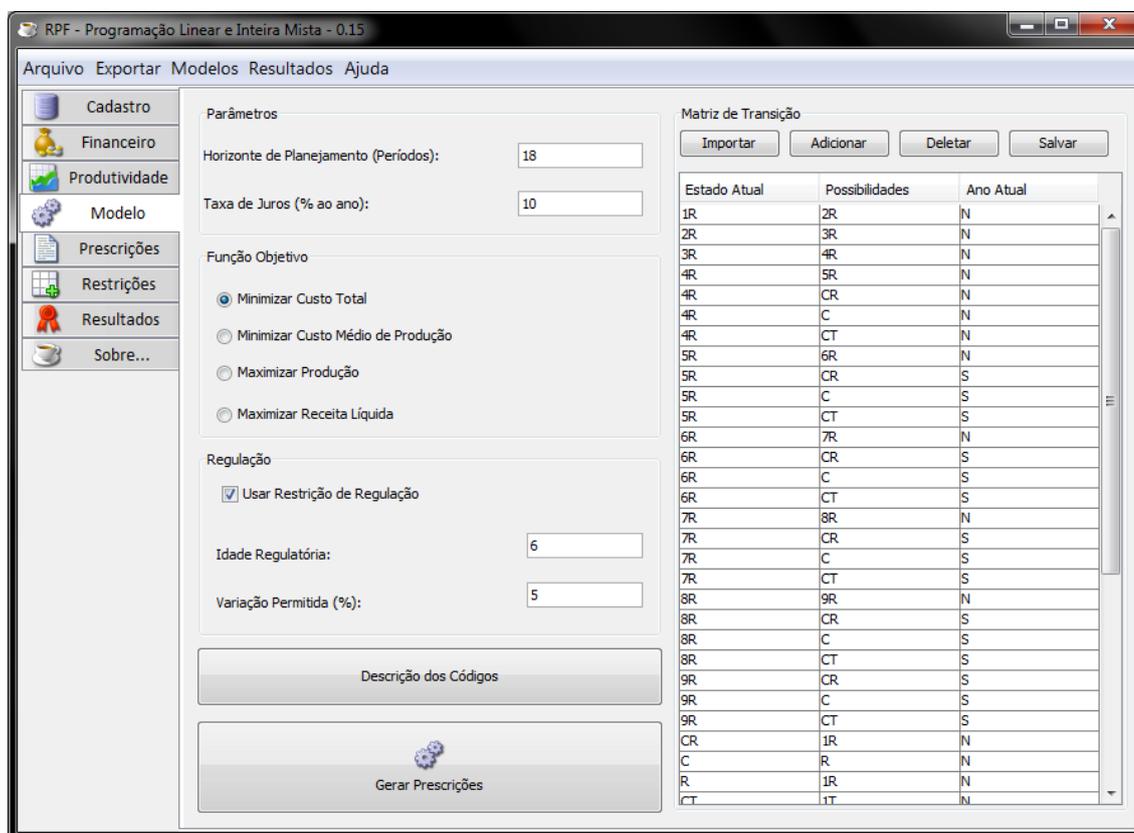


Figura 11: Demonstração da definição da dinâmica e dos possíveis parâmetros do modelo.

## ESTUDOS DE CASO

Por apresentarem as mesmas tabelas de custo e produção, os modelos referentes aos cenários de 1 a 5 se diferenciaram apenas quanto à geração das prescrições e definição das restrições.

### CENÁRIO 1

A matriz de transição do cenário 1 é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8: Matriz de transição para o Cenário 1.

Estado Atual	Possibilidades Futuras
1R	2R
2R	3R
3R	4R
4R	5R, CR
5R	6R, CR
6R	7R, CR
7R	8R, CR
8R	CR
CR	1R

Após a modelagem e a execução do gerador de prescrições, as tabelas de Prescrição, Idade, Rotação, Volume, Custos, Receitas e Financeiro, foram preenchidas pelo RPF, podendo o usuário visualizar as alternativas de manejo elaboradas pelo sistema, bem como seus cálculos.

A restrição de demanda imposta foi modelada definindo uma variável (VOL) que englobasse os estados que possui produção, no caso o estado CR. Após a definição dessa variável, devem-se definir suas características, ou seja, definir qual é o coeficiente utilizado (VOLUME) e em qual tabela o definido estado deve ser procurado (PRESCRICAO). Na seção restrição, são definidos os limites máximo e mínimo por período da variável criada. A Figura 12 é apresentada a definição da restrição no RPF.

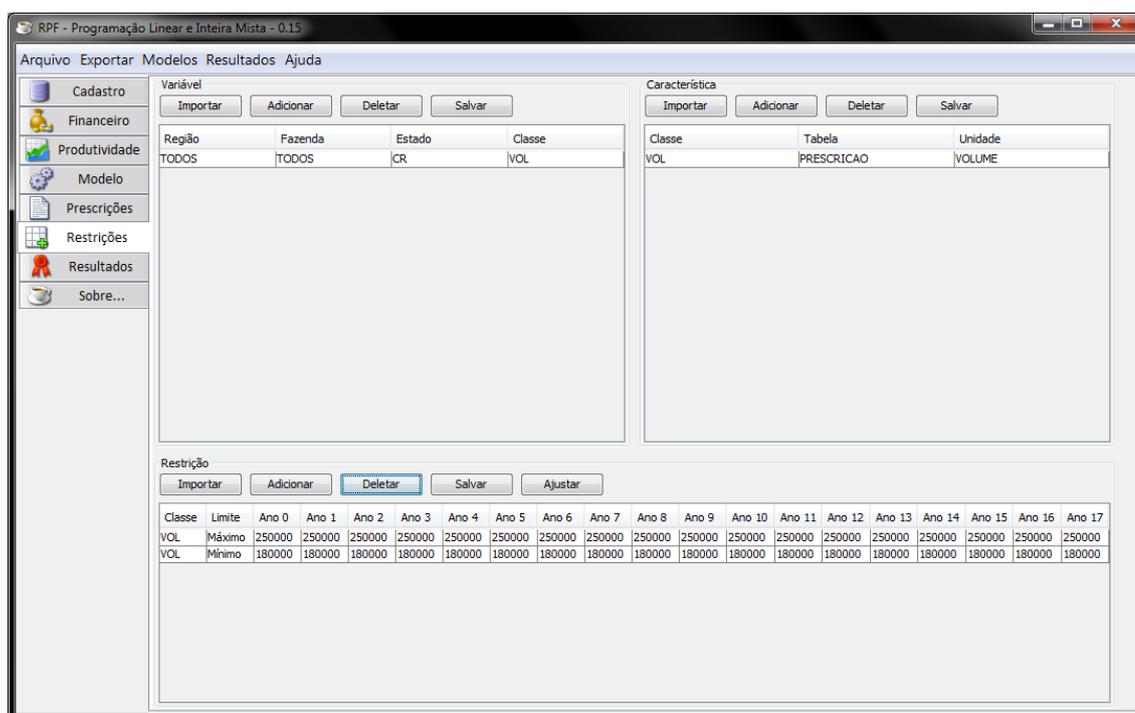


Figura 12: Restrição de demanda volumétrica para o cenário 1 da fazenda modelo.

O RPF foi idealizado para a geração de modelos de regulação florestal utilizando programação linear ou programação inteira. A exportação do modelo é feita no menu Modelos. Os modelos são exportados no formato LP e podem ser resolvidos por diversos otimizadores. No mesmo menu são importados as soluções dos modelos processados. Após a importação da solução dos modelos, são geradas as tabelas referentes as prescrições selecionadas, e suas respectivas características na aba resultados, o que corresponde ao plano de corte.

O cenário 1 resultou em um VPL global de aproximadamente 74 milhões de reais. Na Tabela 9 é apresentado um relatório padrão emitido pelo RPF.

Tabela 9: Principais parâmetros do modelo de regulação do cenário 1

Parâmetro	Idade Média (anos)	Produtividade		Custo Total (R\$)	Volume Total (m <sup>3</sup> )	Receita Total (R\$)
		Média	Média			
			(m <sup>3</sup> /ha)			
Período 0	6,31	411,12		425762,47	250000,00	708949,60
Período 1	7,74	462,18		421735,08	250000,00	696152,00
Período 2	7,46	460,34		426597,23	250000,00	700640,80
Período 3	7,32	457,72		463601,51	250000,00	789082,40

Período 4	6,97	438,17	468189,32	250000,00	772790,40
Período 5	6,11	385,97	345189,24	250000,00	621648,00
Período 6	6,59	448,12	514100,81	250000,00	791305,60
Período 7	7,00	415,79	464558,48	250000,00	783852,80
Período 8	6,37	416,29	472621,71	250000,00	751061,60
Período 9	6,24	404,90	416706,86	250000,00	705949,60
Período 10	5,84	383,30	383978,14	250000,00	724054,40
Período 11	6,09	408,17	481773,83	249384,70	825552,80
Período 12	5,95	347,28	529273,03	250000,00	745012,00
Período 13	6,07	390,71	400891,87	219538,27	591532,00
Período 14	5,72	381,51	398115,48	214373,14	638437,60
Período 15	5,85	373,20	406005,98	249535,34	743487,20
Período 16	5,96	402,20	408732,73	250000,00	762581,60
Período 17	6,30	373,37	424003,88	250000,00	736296,00

## CENÁRIO 2

A matriz de transição do cenário 2 é apresentada na Tabela 10. O objetivo principal desse cenário foi a minimização do custo total da fazenda, tendo como restrição que a área de condução anual não pode ser superior a 200 hectares por período. Essa restrição pode ser escrita no RPF com a criação da variável CT na seção variável, tendo como característica, a tabela PRESCRICAO e unidade AREA. A Figura 13 demonstra a formulação no RPF.

Tabela 10: Matriz de transição para o Cenário 2.

Estado Atual	Possibilidades Futuras
1R	2R
2R	3R
3R	4R
4R	5R
5R	6R, CR, CT
6R	7R, CR, CT
7R	8R, CR, CT

---

8R	CR, CT
CR	1R
1T	2T
2T	3T
3T	4T
4T	5T
5T	6T, CR
6T	7T, CR
7T	8T, CR
8T	CR
CT	1T

---

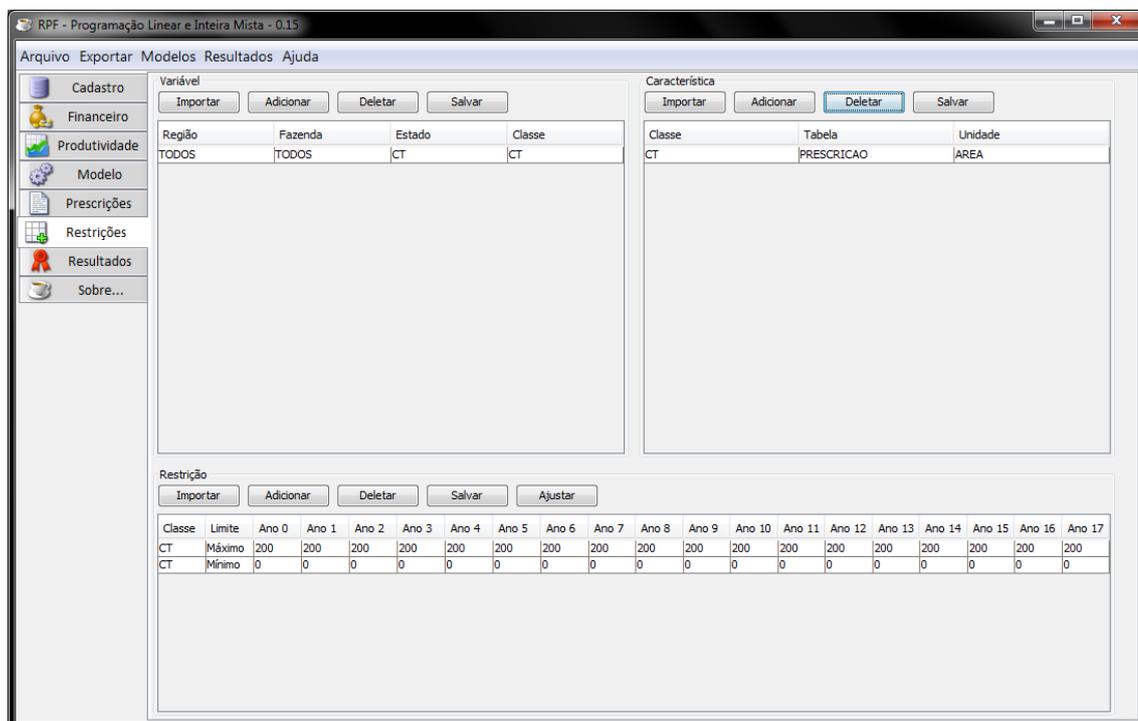


Figura 13: Formulação da restrição de área máxima de corte por período para o cenário 2.

O custo total obtido pelo cenário 2 foi de aproximadamente 70 milhões de reais. Na Tabela 11 é apresentado um relatório padrão emitido pelo RPF.

Tabela 11: Principais parâmetros do modelo de regulação do cenário 2.

Parâmetro	Idade Média (anos)	Produtividade		Custo Total (R\$)	Volume Total (m <sup>3</sup> )	Receita Total (R\$)
		Média	(m <sup>3</sup> /ha)			
Período 0	8,00	410,84		174872,96	43549,12	167044,80
Período 1	9,00	499,38		372334,91	186120,04	639548,00
Período 2	9,00	490,74		356559,84	189179,86	628255,20
Período 3	9,00	465,18		301459,19	169094,07	580089,60
Período 4	9,00	486,25		334378,84	209817,04	630314,40
Período 5	9,00	459,10		347667,42	194658,35	591980,00
Período 6	9,00	455,37		429100,49	195810,19	679026,40
Período 7	9,00	471,16		412441,71	224743,27	761624,00
Período 8	9,00	464,92		362882,72	191547,49	675169,60
Período 9	8,35	416,79		144124,75	65435,73	238396,00
Período 10	9,00	484,70		369517,51	180648,41	624168,00
Período 11	9,00	475,08		298260,04	158915,69	532898,40
Período 12	8,01	406,95		405920,41	228666,53	740753,60
Período 13	7,96	410,76		422520,97	230808,05	756861,60
Período 14	8,02	390,25		437075,89	219282,47	749229,60
Período 15	8,07	392,02		486389,82	220275,59	765964,80
Período 16	7,56	395,59		377482,34	222282,20	692178,40
Período 17	7,08	408,83		438735,47	229721,41	724886,40

### CENÁRIO 3

A matriz de transição do cenário 3 é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12: Matriz de transição para o Cenário 2.

Estado Atual	Possibilidades Futuras
1R	2R
2R	3R
3R	4R
4R	5R
5R	6R, CR, CT, C

6R	7R, CR, CT, C
7R	8R, CR, CT, C
8R	CR, CT, C
CR	1R
1T	2T
2T	3T
3T	4T
4T	5T
5T	6T, CR, C
6T	7T, CR, C
7T	8T, CR, C
8T	CR, C
CT	1T
C	R
R	1R

O objetivo desse cenário é a minimização do custo médio de produção global. A área de corte anual em cada região deve ser maior que 100 hectares. Essa restrição pode ser escrita no RPF com a criação das variáveis CORTE-A; CORTE-B e CORTE-C na seção variável, tendo como característica, a tabela PRESCRICAO e unidade AREA. Cada variável é composta pela existência dos códigos CT, CR e C. A Figura 14 contém uma demonstração da formulação da restrição de área de corte por período e Região no RPF.

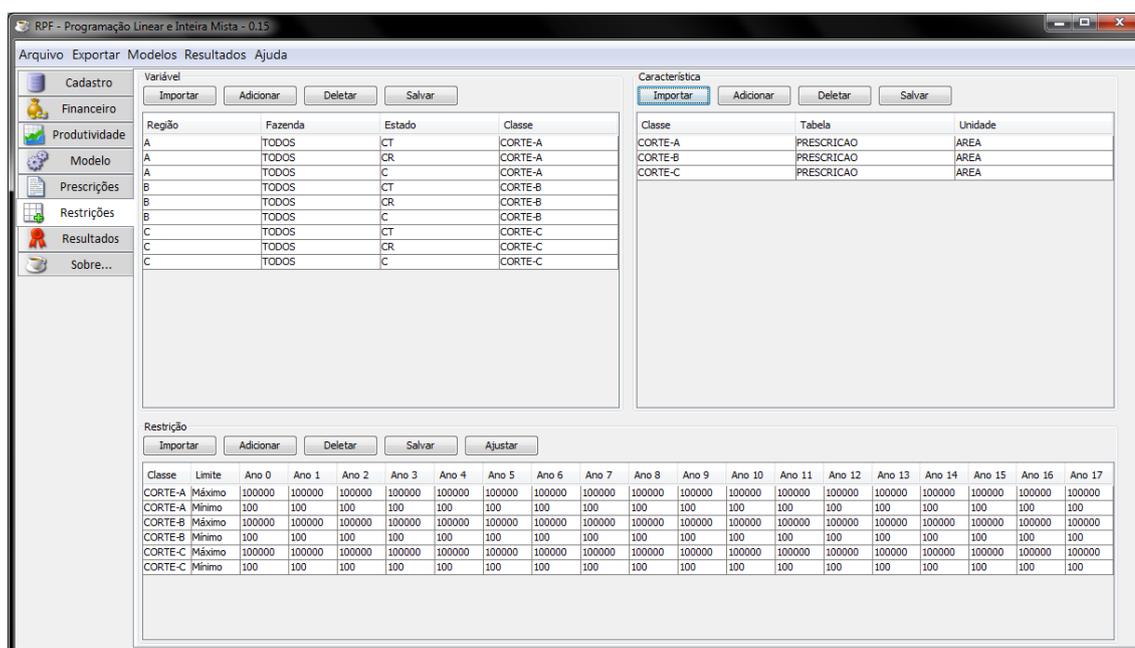


Figura 14: Formulação da restrição de área de corte por período e região, imposta ao cenário 3.

Para o cenário 3 resultou em um custo médio de produção de aproximadamente 46 R\$/m<sup>3</sup> e na Tabela 13 é apresentado um relatório padrão emitido pelo RPF.

Tabela 13: Principais parâmetros do modelo de regulação do cenário 3.

Parâmetro	Idade Média (anos)	Produtividade		Custo Total (R\$)	Volume Total (m <sup>3</sup> )	Receita Total (R\$)
		Média				
		(m <sup>3</sup> /ha)				
Período 0	6,96	407,03		395961,87	182758,59	595912,80
Período 1	8,55	511,61		460730,28	206176,88	854832,80
Período 2	7,90	476,88		451799,00	278452,97	867690,40
Período 3	7,56	457,95		341537,24	184507,73	675236,80
Período 4	7,82	479,07		385125,64	224969,82	766825,60
Período 5	7,41	445,58		419761,75	206301,45	707582,40
Período 6	7,19	412,36		506992,58	203252,89	786600,00
Período 7	7,82	457,22		411233,41	163409,94	713848,80
Período 8	7,80	447,42		415488,90	215523,50	761776,80
Período 9	6,86	434,29		267469,97	146355,67	517185,60

Período 10	6,95	415,18	300950,86	124553,22	504872,80
Período 11	8,21	454,78	462821,39	270551,44	850365,60
Período 12	8,11	446,62	383445,80	159844,97	615216,80
Período 13	7,52	432,89	469999,99	282244,16	869524,80
Período 14	7,67	448,73	386109,90	161050,27	644924,00
Período 15	7,08	426,18	498400,17	224551,73	853929,60
Período 16	7,13	415,40	521425,07	250445,97	932456,00
Período 17	7,63	434,22	442197,45	185367,94	712020,80

#### CENÁRIO 4

A matriz de transição do cenário 4 é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14: Matriz de transição para o Cenário 4.

Estado Atual	Possibilidades Futuras
1R	2R
2R	3R
3R	4R
4R	5R
5R	6R, CR, CT
6R	7R, CR, CT
7R	8R, CR, CT
8R	CR, CT
CR	1R
1T	2T
2T	3T
3T	4T
4T	5T
5T	6T, CR
6T	7T, CR
7T	CR
CT	1T

Esse cenário teve como objetivo a maximização da produção global. A Produção em cada fazenda deve ser maior do que 20000 m<sup>3</sup> por período. Para cada fazenda foi criada uma variável como por exemplo CORTE-A-J, que representa a área de ocorrência dos códigos que geram produção (CT, CR) na tabela prescrição. A modelagem das restrições feita no RPF é apresentada na Figura 15.

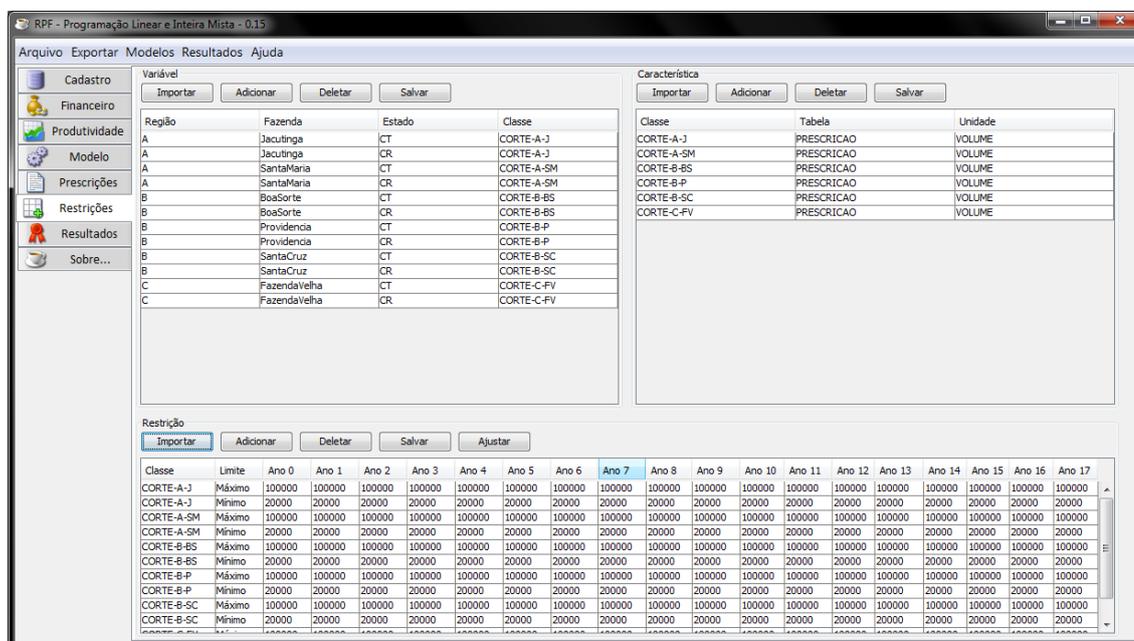


Figura 15: Formulação da restrição de área de corte por período e fazenda, imposta ao cenário 4.

O cenário 4 resultou em uma produção total de aproximadamente 4 milhões de m<sup>3</sup>. Na Tabela 15 é apresentado um relatório padrão emitido pelo RPF.

Tabela 15: Principais parâmetros do modelo de regulação do cenário 4.

Parâmetro	Idade Média (anos)	Produtividade		Custo Total (R\$)	Volume Total (m <sup>3</sup> )	Receita Total (R\$)
		Média	Média			
		(m <sup>3</sup> /ha)	(m <sup>3</sup> /ha)			
Período 0	7,40	442,14	699833,99	338112,75	1066350,40	
Período 1	6,97	450,05	474620,40	257461,16	822873,60	
Período 2	6,85	441,92	501118,81	262273,81	835836,00	
Período 3	6,70	424,30	371292,69	187502,73	594362,40	
Período 4	6,96	435,86	337824,17	177348,81	562084,80	

Período 5	7,14	436,38	331485,76	169277,93	523107,20
Período 6	6,88	423,47	554717,80	290383,45	952102,40
Período 7	6,84	440,98	511771,97	255318,57	855944,00
Período 8	7,23	446,70	403690,52	276637,27	766839,20
Período 9	7,20	449,43	498323,54	289249,93	819852,00
Período 10	7,10	456,08	454921,17	221234,31	801238,40
Período 11	6,90	430,25	373249,23	147810,56	553236,80
Período 12	6,55	420,97	440544,76	236542,73	787352,00
Período 13	6,71	437,13	462005,28	245625,59	780508,00
Período 14	7,02	428,05	381250,46	240521,12	627268,80
Período 15	7,06	439,52	494893,76	246966,59	784895,20
Período 16	7,08	448,18	419470,40	251830,93	789941,60
Período 17	7,17	413,71	810018,94	387436,39	1407412,00

## CENÁRIO 5

O cenário 5 apresentou a dinâmica equivalente a apresentada para o cenário 1. O objetivo desse cenário foi a maximização do Valor Presente Líquido Global a produção total foi limitada entre 180.000 e 300.000 m<sup>3</sup> por período e somente uma prescrição foi atribuída a cada unidade de manejo. Este modelo foi resolvido por Programação Inteira Mista, resultado em um valor de aproximadamente 73 milhões de reais de VPL global. Na tabela 16 é apresentado um relatório padrão emitido pelo RPF.

Tabela 16: Principais parâmetros do modelo de regulação do cenário 5.

Parâmetro	Idade Média (anos)	Produtividade		Custo Total (R\$)	Volume Total (m <sup>3</sup> )	Receita Total (R\$)
		Média	(m <sup>3</sup> /ha)			
Período 0	6	433		312602	206090,12	487231
Período 1	9	458		340489	206296,31	503704,8
Período 2	8	474		371374	207907,14	632533
Período 3	8	458		405398	180782,99	702639,2
Período 4	8	441		313209	206723,26	537860,8

Período 5	7	410	368412	207834,12	626730
Período 6	9	456	346166	205573,14	445827
Período 7	8	422	443489	208816,14	705264
Período 8	7	440	293351	206219,09	497527
Período 9	8	457	243061	205916,46	473317
Período 10	7	429	333233	206838,15	540052
Período 11	8	437	241811	205219,23	417551
Período 12	7	391	779277	201407,09	1125570,4
Período 13	6	367	227930	204453,67	356254
Período 14	7	401	337725	207665,41	613232,8
Período 15	7	352	141447	203136,96	250887,2
Período 16	7	341	421344	208294,13	663530,4
Período 17	6	338	504371	207924,97	633997,6

---

## DISCUSSÃO

Este trabalho teve como objetivo iniciar, desenvolver, implementar e validar um projeto de construção de um sistema computacional, para auxiliar os gestores florestais, acadêmicos e extensionistas na construção de modelos de regulação da produção florestal, tendo como principal característica ser distribuído gratuitamente. Neste estudo foram apresentados os princípios básicos do sistema de apoio à decisão desenvolvido (RPF – Regulação da Produção Florestal), destacando suas características e formas de resolução de problemas de regulação florestal. Foram idealizados e desenvolvidos cinco estudos de caso abordando situações típicas encontradas no setor florestal brasileiro.

O projeto foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Java. Essa linguagem foi escolhida pelo fato de ser uma linguagem simples, orientado a objetos, ser robusta, segura, neutro em relação à arquitetura, portátil, interpretado, alto desempenho, múltiplos *threads*, dinâmica, dentre outras características (HORSTMANN e CORNELL, 2009). O fato de ser simples permite a continuidade do projeto por outros estudantes de graduação, pós-graduação, professores ou profissionais do ramo. O fato de ser orientado a objetos permite que futuras alterações possam ser facilmente implementadas e adicionadas ao projeto. A segurança é extremamente importante quando se trata da utilização da linguagem em ambientes de redes comumente encontrados nas empresas do setor. O fato de ser portátil permite a utilização do sistema em diferentes sistemas operacionais, como Linux, Windows e Mac OS.

Embora esta versão inicial do software exija a utilização de um solver externo, sua aplicação por diferentes usuários é viável, uma vez que as soluções existentes no mercado exigem investimentos financeiros significativos, sendo restritos à empresas de maior porte. Além disso, pela natureza do RPF, solvers de natureza livre como PL\_solver também podem ser utilizados em substituição de sistemas comerciais.

Uma característica importante do RPF é a sua simplicidade e a possibilidade de visualizar todas as etapas da construção e solução do modelo de regulação florestal. Isto resulta na possibilidade de uso do sistema, também, para atividades acadêmicas.

O sistema desenvolvido neste trabalho (RPF) é eficiente e consistente e pode ser útil aos gestores no processo de construção e interpretação de modelos de regulação da produção florestal, contudo melhorias são necessárias. Como propostas para o desenvolvimento de novos recursos para o RPF destacam-se:

- ✓ Possibilidade de simulação de desbastes, contemplando diferentes usos da madeira;
- ✓ Receita diferenciada para diferentes produtos ou dimensões da madeira;
- ✓ Consideração do valor residual diferenciado por região ou fazenda;
- ✓ Consideração do valor pela venda de madeira diferenciada por região ou fazenda;
- ✓ Integração do cadastro e dos resultados com ferramentas de SIG (Sistema de Informação Geográfica);
- ✓ Geração de relatórios em formato padronizado de uma maneira mais amigável ao usuário;
- ✓ Exportação dos modelos de PL e PIM no formato MPS (*Mathematical Programming System*) e AMPL (*A Mathematical Programming Language*);
- ✓ Incorporação do otimizador matemático, para a resolução dos modelos de PL e PIM dentro do próprio RPF;
- ✓ Interpretação das análises de sensibilidade dos modelos de PL.;
- ✓ Incorporação de técnicas heurísticas para a solução de modelo de PIM;
- ✓ Possibilidade de utilização de diferentes tabelas de custos, receita e produção para cada período do horizonte de planejamento;
- ✓ Possibilidade de utilização de períodos de diferentes tamanhos;

- ✓ Capacidade de implementação de restrições sociais, ambientais e espaciais ao modelo;
- ✓ Possibilidade de projeção volumétrica utilizando modelos de distribuição diamétrica e modelos em nível de árvore individual, bem como a simulação de desbastes utilizando os mesmos;
- ✓ Integração com SGBD (Sistemas de Gerenciamento de Bancos de Dados), como o MySQL, Firebird, PostgreSQL, dentre outros;

## **CONCLUSÃO**

O projeto RPF é eficiente e flexível para a simulação de cenários, podendo ser utilizado para a construção de modelos de regulação da produção florestal.

O sistema RPF solucionou o estudo de caso proposto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, L. P.; GREBNER, R. L. **Forest Management and Planning**. Elsevier. 2009, 331 p.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley e Sons, 1983, 333 p.

DAVIS, K. P. **Forest management: regulation and valuation**. 2ª edição New York: McGraw-Hill, 1966, 519 p.

HORSTMANN, C. S.; CORNELL, G. **Core Java**, Volume I – Fundamentos, 8ª edição, Pearson Prentice Hall, 2010, 383 p.

IVERSON, D. C.; ALSTON, R. M. **The genesis of FORPLAN a historical and analytical review of Forest Service planning models**. USDA Forest Service General Technical Report, INT-214: p1-25, 1986.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. **Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives: discussion and synthesis**. Forest science monography, 18: p.1-31. 1977.

LEUSCHNER, W. A. **Introduction to Forest resource management**. New York: John Wiley and Sons, 1984, 284 p.

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 225p. Doutorado em Ciência Florestal Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

TAUBE NETTO, M. Um modelo de programação linear para planejamento de florestas de eucalipto. **Pesquisa Operacional**, Campinas, v.4, n.1, p.19-39, 1984.

## **CAPÍTULO 2**

### **SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A OTIMIZAÇÃO DE MULTIPRODUTOS MADEIREIROS**

#### **INTRODUÇÃO**

A obtenção otimizada de multiprodutos da madeira é um dos mais clássicos problemas do manejo sustentável dos recursos florestais madeireiros. Diversos modelos de otimização com o objetivo de maximizar a receita e o volume de árvores, talhões e grupo de talhões foram desenvolvidos (PNEVMATICOS e MANN, 1972; NÄSBERG, 1985; SESSIONS, 1988; ENG et al., 1986; MENDOZA e BARE, 1986; SESSIONS et al., 1989; LEITE, 1994; PICKENS et al., 1997; KIVINEN, 2003; MARSHALL, 2005).

Diversos produtos podem ser obtidos a partir dos povoamentos florestais, como madeira serrada, laminados, aglomerados, painéis, madeira para energia, cavacos para celulose e papel, dentre outros. Estes produtos possuem diferentes especificações técnicas, valores e demandas de mercado o que torna a definição de suas proporções uma escolha complexa (LEITE, 1994).

A principal técnica de otimização utilizada quando se deseja obter o máximo de lucro ou volume útil de uma determinada árvore é a programação recursiva (programação dinâmica (PD)), sendo que a programação inteira (PI) e linear (PL) são preferidas quando se realiza a otimização considerando aspectos

globais do empreendimento, como demandas de consumo e diferentes dimensões de fustes (MARSHALL, 2005).

Muitas dessas formulações foram implementadas em sistemas computacionais comumente com propósitos educacionais (MARSHALL, 2005). Exemplos desses programas são OSU BUCK© (SESSIONS 1988), AVIS (GEERTS e TWADDLE 1984), VISION (LEMBERSKY e CHI 1984), HW Buck, (PICKENS et al. 1992), DynaTree, SawModels e SigmaE (LEITE e RIBEIRO, 2002), DSS (ČIŽMAN e URH 2005), dentre outros. Porém, na maioria das vezes o desenvolvimento contínuo e a implementação de melhorias nesses sistemas fica restrita aos desenvolvedores. Assim, o desenvolvimento de soluções em código livre é importante.

## **OBJETIVO**

O objetivo desse estudo foi iniciar, desenvolver, implementar e validar um projeto de construção de um sistema computadorizado, para auxiliar os gestores florestais, acadêmicos e extensionistas na obtenção de multiprodutos madeireiros de maneira otimizada.

Os objetivos específicos foram de apresentar a fundamentação teórica sobre o tema e os princípios básicos do sistema de apoio à decisão desenvolvido, OtimToras – Otimização de multiprodutos florestais, destacando suas características e formas de resolução de problemas de otimização de multiprodutos, bem como formular e resolver um modelo característico do setor utilizando o sistema desenvolvido.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **DESENVOLVIMENTO DO PROJETO**

O OtimToras foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Java. Como ambiente de desenvolvimento foi utilizada a IDE (Integrated Development Environment) Netbeans 7.0.1, e a JDK 7 (Java Development Kit ). Os testes do sistema foram realizados em ambiente Windows. O software foi desenvolvido com o intuito da geração e interpretação de modelos matemáticos em formato de programação inteira mista, bem como sua resolução através da meta-heurística Algoritmos Genéticos (AG).

### **PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA**

A formulação do problema será baseada na geração de alternativas de processamento para cada classe de diâmetro, sendo esta em função da forma da árvore e das dimensões dos sortimentos e produtos. Na formulação do modelo de PIM, a variável de decisão  $X_{ij}$  representa o  $j$ -ésimo padrão de corte atribuído a  $i$ -ésima classe de diâmetro. Para cada classe de diâmetro são geradas todas as possíveis alternativas de processamento (toragem) que possam ser adotadas.

## FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo tem o papel fundamental de expressar o objetivo do proprietário. Diversos objetivos podem ser incluídos, considerando diversos aspectos de ordem econômica, técnica, social e ambiental, sendo mais comum a maximização do valor líquido global (VPL) ou do volume útil total (VOL). A função objetivo tendo como objetivo maximizar o VPL global do investimento assume a seguinte configuração:

$$Max. Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

em que  $Z$  é o Valor Presente Líquido Global (R\$);  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a  $j$ -ésima alternativa de corte adotada na  $i$ -ésima classe de diâmetro;  $c_{ij}$  é o Valor Presente Líquido por cada classe de diâmetro  $i$ , seguindo a alternativa de corte  $j$ ;  $m$  é o número total de classe de diâmetro;  $n$  é número total de alternativas de corte para a  $i$ -ésima classe de diâmetro.

A função objetivo tendo como objetivo maximizar o volume total produzido durante a toragem do povoamento assume a seguinte configuração:

$$Max. Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

em que  $Z$  é a produção volumétrica total ( $m^3$ );  $x_{ij}$  são as variáveis de decisão, representando a  $j$ -ésima alternativa de corte adotada na  $i$ -ésima classe de diâmetro;  $c_{ij}$  é o volume produzido pela classe de diâmetro  $i$ , manejada segundo a alternativa de corte  $j$ ;  $m$  é o número total de classe de diâmetro;  $n$  é número total de alternativas de corte para a  $i$ -ésima classe de diâmetro.

A formulação do problema de otimização exige que a soma de todas as alternativas atribuídas a uma mesma árvore seja igual ou menor que o número de árvores contidas nesta classe diamétrica:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

em que; se  $x_{ij}$  assumir valor 1 a  $j$ -ésima alternativa de corte adotada na  $i$ -ésima classe de diâmetro.

A definição das restrições de demanda devem assegurar a alocação de uma produção para atender à uma demanda mínima e máxima preestabelecida de cada produto, podendo ser descrita da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ijk} x_{ij} \geq Dmin_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ijk} x_{ij} \leq Dmax_k \quad \{k = 0, 1, \dots, H - 1\}$$

em que  $x_{ij}$  são variáveis de decisão, representando a  $j$ -ésima alternativa de corte adotada na  $i$ -ésima classe de diâmetro;  $m$  é o número total classes de diâmetro;  $n$  é número total de alternativas de corte para a  $i$ -ésima classe de diâmetro;  $V_{ijk}$  é o volume ( $m^3$ ) produzido por classe de diâmetro, do produto  $k$ , pela  $i$ -ésima classe de diâmetro adotando-se a  $j$ -ésima alternativa de corte;  $Dmin_k$  e  $Dmax_k$  são as demandas volumétricas ( $m^3$ ) mínima e máxima respectivamente, de cada produto.

Os modelos matemáticos podem ser solucionados utilizando técnicas matemáticas tradicionais como o algoritmo *branch and bound*, ou através de meta-heurísticas. Ambas as formas foram implementadas nesse projeto.

## CASO DE USO

Para uma melhor apresentação do projeto OtimToras, foi idealizado um estudo de caso com uma empresa modelo, tentando representar uma situação comumente encontrada em empresas destinadas à produção e comercialização de multiprodutos. O objetivo definido foi a maximização do volume total útil.

A distribuição diamétrica utilizada foi idealizada com o intuito de representar povoamentos de diversas espécies (como dos gêneros *Pinus*, *Eucalyptus*, e *Tectona*). A distribuição diamétrica utilizada é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Distribuição de diâmetros utilizada para o estudo

Classe de Diâmetro	Centro de Classe (cm)	Altura Média (m)	Frequência (n/ha)
1	15	22,7	10
2	17	24,0	15
3	19	25,1	25
4	21	26,0	13

Para a simulação de restrições operacionais e comerciais, a empresa modelo com a produção dos seguintes sortimentos, e suas respectivas especificações.

Tabela 2: Características dos produtos utilizados no estudo

Produtos	Comprimento (cm)	Diâmetro Máximo (cm)	Diâmetro Mínimo (cm)	Valor (R\$/m <sup>3</sup> )
Serraria	400	200	10	500
Celulose	200	50	5	150
Energia	200	50	3	100

O modelo de taper utilizado nesse estudo é o modelo de Kozak, conforme apresentado em Campos e Leite, 2009. A expressão utilizada é apresentada abaixo:

$$d = dap \sqrt{0,933023 - 1,155740 \left(\frac{h}{H}\right) + 0,199849 \left(\frac{h}{H}\right)^2}$$

em que,  $d$  é o diâmetro comercial na altura  $h$  (cm);  $dap$  é o diâmetro (cm) medido a 1,30 m de altura do solo;  $H$  é a altura total (m);  $h$  é a altura onde ocorre o diâmetro comercial  $d$  (m).

As restrições impostas referem-se aos volumes máximos e mínimos permitidos de cada produto. As restrições impostas ao estudo de caso são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Volumes máximo e mínimo permitido de cada produto

Produtos	Limites (m <sup>3</sup> )	
	Máximo	Mínimo
Serraria	15	1
Celulose	50	5
Energia	50	5

## RESULTADOS

O sistema computacional denominado por OtimToras (Otimizador de Multiprodutos Madeireiros) foi desenvolvido visando tornar-se o mais amigável possível ao usuário, admitindo certa flexibilidade na escolha de modelos de *taper*, produtos e restrições, e uma ampla visualização do processo matemático necessário para a geração dos modelos matemáticos. A estrutura do software baseia-se na estrutura apresentada na Figura 2.

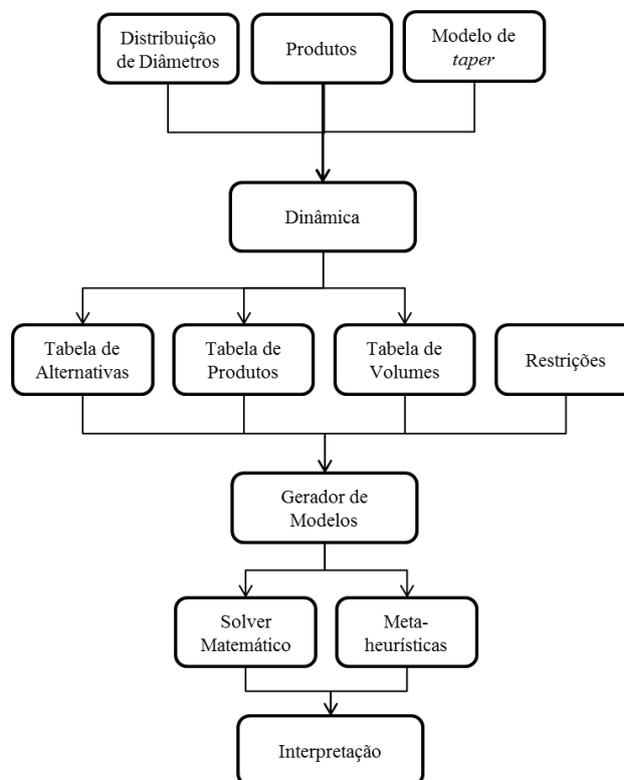


Figura 2: Estrutura básica do sistema OtimToras.

A tela inicial do OtimToras é apresentada na Figura 3. No menu “Arquivo” a estrutura completa dos modelos formulados, bem como os dados utilizados podem ser salvos ou abertos.



Figura 3: Tela inicial do OtimToras.

As informações relacionadas as classes de diâmetro são inseridas na aba Dados (Figura 4). As informações necessárias são referentes a chave, classe diamétrica (cm), altura(m) e frequência(n/ha). A coluna chave representa algum fator de estratificação, podendo ser definido como o número do talhão ou fazenda.

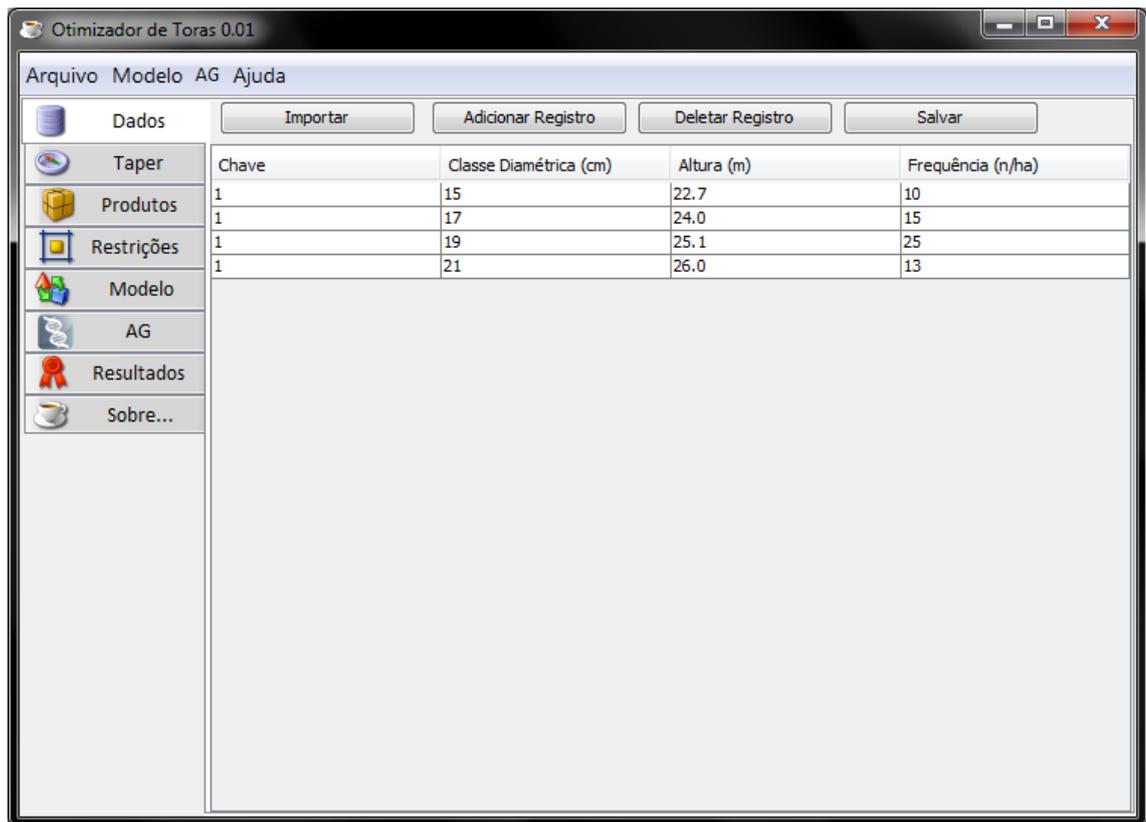


Figura 4: Tela de cadastro das classes de diâmetro.

A avaliação de multiprodutos da madeira exige estimativa de vários diâmetros ao longo do fuste das árvores, através de equações de taper ou afilamento (HUSCH et al., 1982). A quantificação de multiprodutos depende da formulação de alternativas viáveis de corte considerando o comprimento, diâmetro máximo e mínimo dos sortimentos. O sistema OtimToras permite a utilização de Kozak(1), Demaerschalk(2), Omerod(3), Garay(4) e Garcia(5), demonstrações sobre o uso desses e de outros modelos são encontrados em Campos e Leite (2009). A Figura 5 contém a tela de definição dos modelos de *taper* do sistema desenvolvido. As expressões de cálculo do diâmetro comercial desses modelos são:

$$d = dap \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{H}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{H}\right)^2} \quad (1)$$

$$d = 10^{\beta_0} dap^{\beta_1} H^{2\beta_2} (H - h)^{2\beta_3} \quad (2)$$

$$d = dap \left(\frac{H-h}{H-1,3}\right)^{\beta_0} \quad (3)$$

$$d = dap \beta_0 \left(1 + \beta_1 \ln(1 - \beta_2 h^{\beta_3} H^{-\beta_3})\right) \quad (4)$$

$$d = dap \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} + \beta_2 \left(\frac{h}{H}\right)} \quad (5)$$

em que,  $d$  é o diâmetro comercial na altura  $h$  (cm);  $dap$  é o diâmetro medido a 1,30 m de altura do solo (cm);  $H$  é a altura total (m);  $h$  é a altura onde ocorre o diâmetro comercial  $d$  (m).

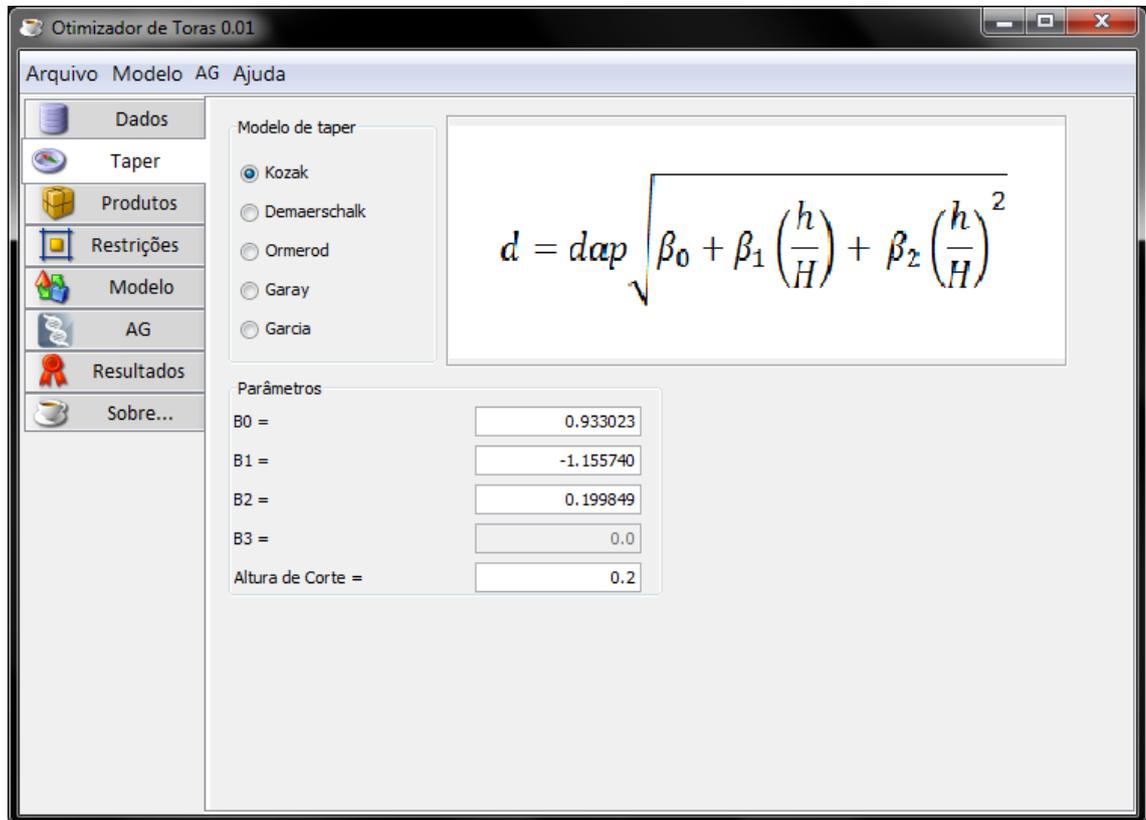


Figura 5: Tela de definição dos modelos de *taper*.

A descrição dos produtos que poderão ser fabricados é inserida na aba “Produtos”, conforme Figura 6. Na descrição dos produtos deve conter os valores de Comprimento, diâmetro mínimo e máximo permitidos, rendimento, e receita obtida.

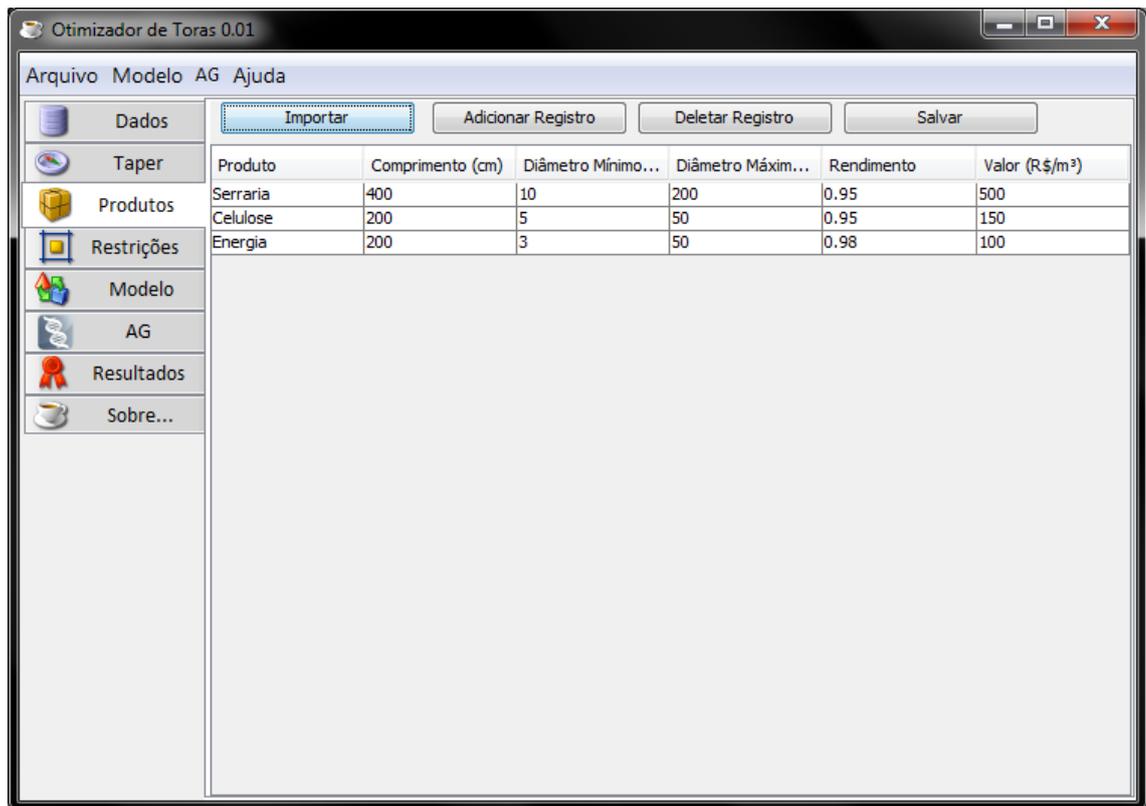


Figura 6: Tela de definição dos produtos utilizados.

Na aba restrições são definidos os valores máximos e mínimos de cada produto, conforme apresentado na Figura 7.

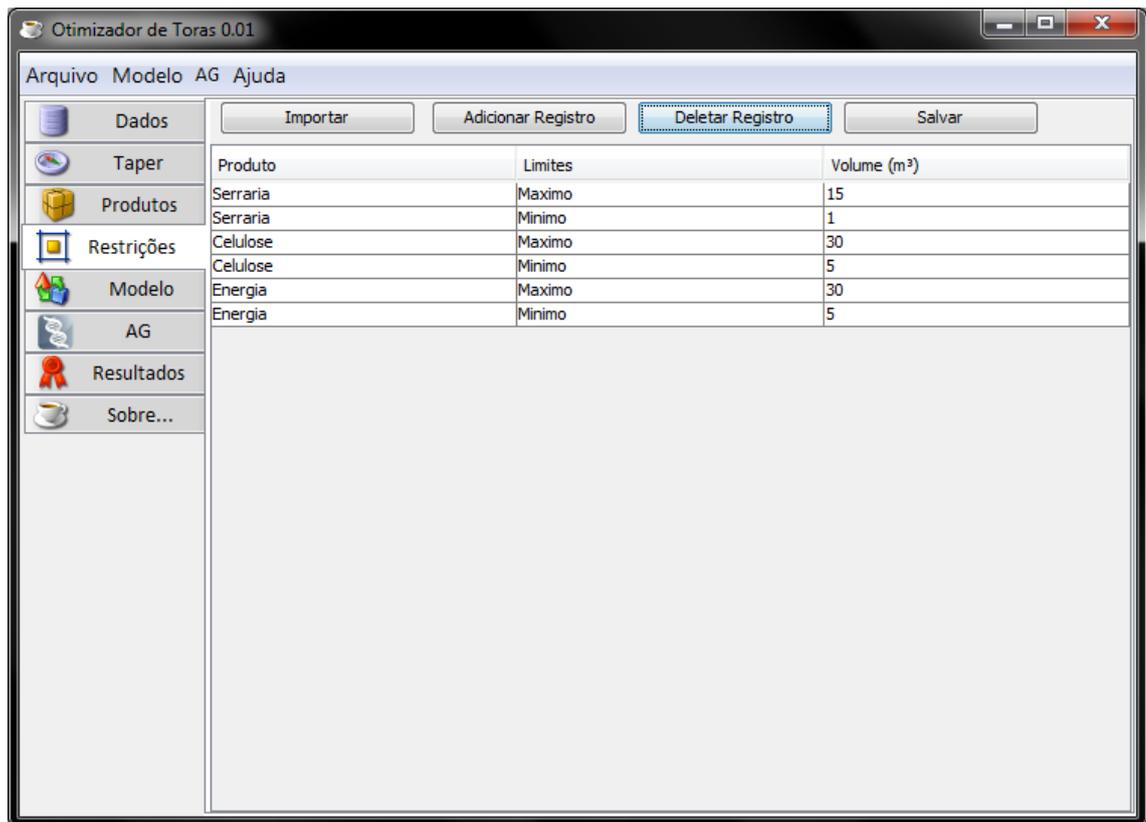


Figura 7: Tela de restrições onde são definidos os valores máximos e mínimos de cada produto.

A função objetivo pode ser definida na aba “AG”, juntamente com alguns parâmetros da meta-heurística algoritmos genéticos (Figura 8). Como função objetivo pode-se maximizar a receita total ou o volume total produzido.

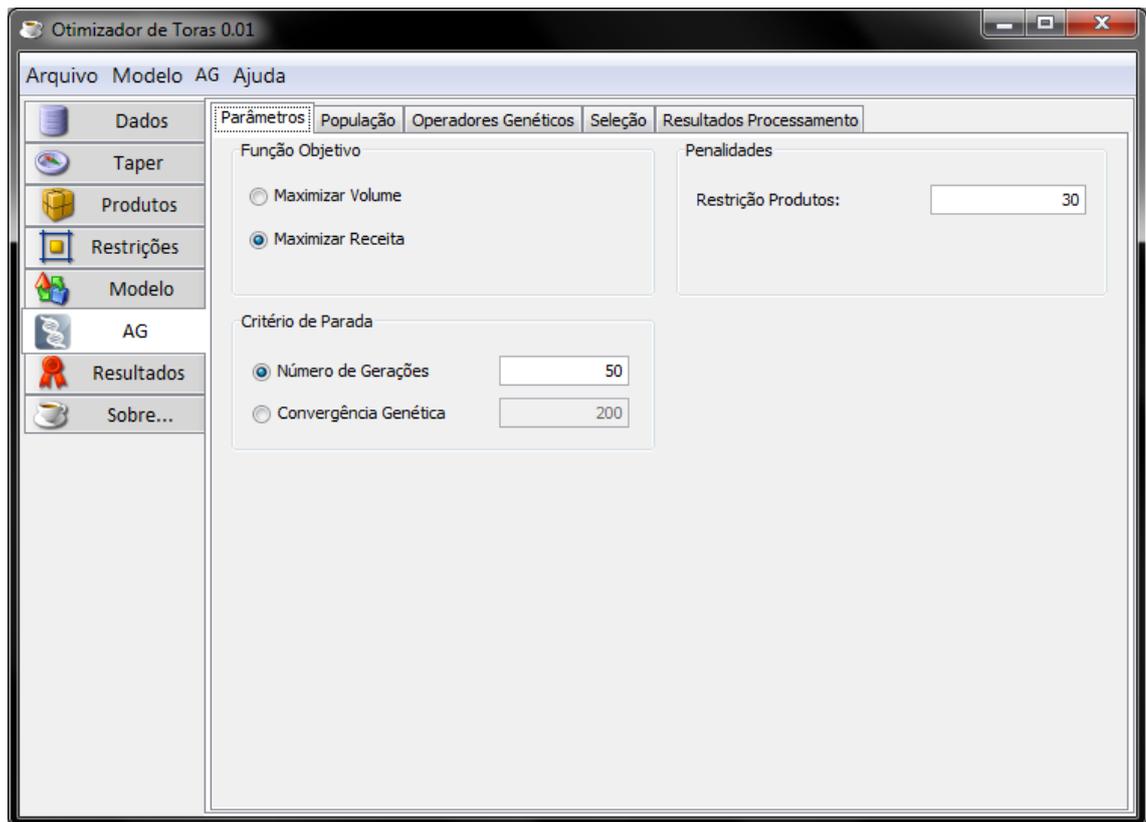


Figura 8: Tela de definição da função objetiva utilizada e de alguns parâmetros da meta-heurística algoritmos genéticos.

As alternativas de corte podem ser geradas no menu “Modelo”, em “Gerar Alternativas”. A geração das alternativas resulta na geração de três tabelas (alternativas, volumes e produtos). Na tabela alternativas, são demonstrados os valores gerais de cada alternativa de corte, como volume e receita total (Figura 9). Na tabela de produtos são demonstrados todos os produtos e suas posições no decorrer da árvore (Figura 10). Na tabela volume são apresentados os volumes obtidos para cada produto em cada prescrição, bem como os resíduos obtidos (Figura 11).

Chave	Classe de Diâmetro	Alternativa de Corte	Receita (R\$)	Volume Total (m³)
1	21.0	1	55.78684572603149	0.3733246552086772
1	21.0	2	55.357995756636384	0.3733246552086772
1	21.0	3	55.132806648125275	0.3733246552086772
1	21.0	4	54.70395667873017	0.3733246552086772
1	21.0	5	54.899425845228066	0.3733246552086772
1	21.0	6	54.470575875832964	0.3733246552086772
1	21.0	7	54.245386767321854	0.3733246552086772
1	21.0	8	53.81653679792676	0.3733246552086772
1	21.0	9	54.65785334794475	0.3733246552086772
1	21.0	10	54.229003378549656	0.3733246552086772
1	21.0	11	54.003814270038546	0.3733246552086772
1	21.0	12	53.574964300643444	0.3733246552086772
1	21.0	13	53.77043346714134	0.3733246552086772
1	21.0	14	53.341583497746235	0.3733246552086772
1	21.0	15	53.116394389235126	0.3733246552086772
1	21.0	16	52.68754441984002	0.3733246552086772
1	21.0	17	54.408089156275345	0.3733246552086772
1	21.0	18	53.97923918688025	0.37332465520867725
1	21.0	19	53.75405007836913	0.3733246552086772
1	21.0	20	53.32520010897404	0.37332465520867725
1	21.0	21	53.520669275471924	0.3733246552086772
1	21.0	22	53.09181930607683	0.3733246552086772
1	21.0	23	52.86663019756571	0.3733246552086772
1	21.0	24	52.43778022817062	0.3733246552086772
1	21.0	25	53.27909677818862	0.3733246552086772
1	21.0	26	52.85024680879352	0.3733246552086772

Figura 9: Tabela de alternativas geradas pelo OtimToras.

Alte...	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Celulose	Energia										
2	Celulose	Energia										
3	Celulose	Energia	Energia									
4	Celulose	Energia	Energia	Energia								
5	Celulose	Energia	Celulose	Celulose	Energia							
6	Celulose	Energia	Celulose	Energia	Energia							
7	Celulose	Energia	Energia	Celulose	Energia							
8	Celulose	Energia	Energia	Energia	Energia							
9	Celulose	Energia	Celulose	Celulose	Celulose	Energia						
10	Celulose	Energia	Celulose	Celulose	Energia	Energia						
11	Celulose	Energia	Celulose	Energia	Celulose	Energia						
12	Celulose	Energia	Celulose	Energia	Energia	Energia						
13	Celulose	Energia	Energia	Celulose	Celulose	Energia						
14	Celulose	Energia	Energia	Celulose	Energia	Energia						
15	Celulose	Energia	Energia	Energia	Celulose	Energia						
16	Celulose	Energia	Energia	Energia	Energia	Energia						
17	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia
18	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Energia
19	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Celulose	Celulose	Energia	Celulose	Energia
20	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Celulose	Celulose	Energia	Energia	Energia
21	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Celulose	Energia	Celulose	Celulose	Energia
22	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Celulose	Energia	Celulose	Energia	Energia
23	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Celulose	Energia	Energia	Celulose	Energia
24	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Celulose	Energia	Energia	Energia	Energia
25	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Energia	Celulose	Celulose	Celulose	Energia
26	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Energia	Celulose	Celulose	Energia	Energia

Figura 10: Tabela de produtos obtidos.

Alternativa	Serraria	Celulose	Energia	Resíduos (m³)
1	0.0	0.3690876041032753	0.004237051105401...	6.324106308247061...
2	0.0	0.3605106047153733	0.012814050493303...	6.324106308247061...
3	0.0	0.3560068225451511	0.0173178326635261	6.324106308247061...
4	0.0	0.3474298231572491	0.02589483205142814	6.324106308247061...
5	0.0	0.3513392064872069	0.021985448721470...	6.324106308247061...
6	0.0	0.3427622070993049	0.03056244810937232	6.324106308247061...
7	0.0	0.3382584249290827	0.035066230279594...	6.324106308247061...
8	0.0	0.3296814255411807	0.043643229667496...	6.324106308247061...
9	0.0	0.3465077565415407	0.026816898667136...	6.324106308247061...
10	0.0	0.3379307571536387	0.03539389805503853	6.324106308247061...
11	0.0	0.3334269749834165	0.03989768022526069	6.324106308247061...
12	0.0	0.3248499755955145	0.04847467961316273	6.324106308247061...
13	0.0	0.3287593589254723	0.044565296283204...	6.324106308247061...
14	0.0	0.3201823595375703	0.053142295671106...	6.324106308247061...
15	0.0	0.3156785773673481	0.057646077841329...	6.324106308247061...
16	0.0	0.3071015779794461	0.0662230772292311	6.324106308247061...
17	0.0	0.3415124727081525	0.03181218250052473	6.324106308247061...
18	0.0	0.3329354733202505	0.04038918188842676	6.324106308247061...
19	0.0	0.3284316911500283	0.04489296405864892	6.324106308247061...
20	0.0	0.3198546917621263	0.05346996344655095	6.324106308247061...
21	0.0	0.3237640750920841	0.049560580116593...	6.324106308247061...
22	0.0	0.3151870757041821	0.05813757950449513	6.324106308247061...
23	0.0	0.3106832935339599	0.06264136167471729	6.324106308247061...
24	0.0	0.3021062941460579	0.07121836106261933	6.324106308247061...
25	0.0	0.3189326251464179	0.05439203006225931	6.324106308247061...
26	0.0	0.3103556257585159	0.06296902945016133	6.324106308247061...

Figura 11: Tabela de volumes obtidos em cada prescrição.

Após a geração das alternativas de corte o modelo matemático pode ser exportado no menu “Modelo” em “Exportar Modelo Matemático”. O modelo é escrito em formato lp para a solução em softwares comerciais, como lingo, lindo, Lp\_Solver, dentre outros. Após a resolução do modelo matemático, este pode ser importado no mesmo menu, no item “Importar Solução do Modelo”. O modelo pode ser solucionado através da meta-heurística algoritmos genético.

Na aba “Resultados” são apresentados os resultados do processamento, demonstrando qual prescrição foi assinalada a cada classe de diâmetro (Figura 12), bem como os produtos (Figura 13), e a sequência de corte ótimo para o problema (Figura 14).

Chave	Classe de Diâme...	Alternativa de C...	Receita (R\$)	Volume Total (m³)	Número de Árvo...
1	15.0	32667	37.32286302073...	0.161698040512...	10
1	17.0	10297	56.75130654141...	0.225485203324...	15
1	19.0	12642	72.89833938168...	0.293310327189...	25
1	21.0	28011	135.5796245832...	0.373570406040...	13

Figura 12: Prescrições assinaladas as classes de diâmetro.

Alte...	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
32667	Energia	Serraria	Energia	Energia	Energia	Celulose	Energia	Energia				
10297	Serraria	Celulose	Celulose	Energia	Energia	Energia	Celulose	Celulose	Energia	Energia		
12642	Serraria	Celulose	Energia	Energia	Celulose	Celulose	Celulose	Energia	Celulose	Energia		
28011	Serraria	Celulose	Energia	Serraria	Serraria	Celulose	Energia	Energia	Energia			

Figura 13: Produtos gerados pela sequencia de corte ótima.

Alternativa	Serraria	Celulose	Energia	Resíduos (m³)
32667.0	0.051429490454040036	0.011625255757229...	0.09864329430130102	0.003574809347280...
10297.0	0.07537075607358175	0.08108967559061937	0.06902477166032135	4.761038685486269E-4
12642.0	0.09464498463662084	0.11418625616128922	0.08447908639177526	0.001840466527910...
28011.0	0.23718858454524808	0.06694300322196439	0.06943881827304782	6.324106308247061E-4

Figura 14: Volumes gerados pela sequencia de corte ótima para cada produto.

O modelo gerado para o estudo de caso proposto resultou em 45518 alternativas de corte válidas. A solução do modelo gerado resultou em um volume total de aproximadamente 17 m<sup>3</sup>, com uma receita de R\$ 4809,49.

## DISCUSSÃO

Esse trabalho teve como objetivos específicos apresentar os princípios básicos do sistema de apoio à decisão desenvolvido (OtimToras – Otimização de Multiprodutos Florestais), destacando suas características e formas de resolução de problemas de otimização de multiprodutos, bem como formular e resolver um estudo de caso característico do setor utilizando o sistema desenvolvido.

O projeto foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Java, por ser uma linguagem simples, orientado a objetos, ser robusta, segura, neutro em relação à arquitetura, portátil, interpretado, alto desempenho, múltiplos threads, dinâmica, dentre outras características (Horstmann e Cornell, 2009). O fato de ser simples permite a continuidade do projeto por outros estudantes de graduação, pós-graduação, professores ou profissionais do ramo. O fato de ser orientado a objetos permite que futuras alterações possam ser facilmente implementadas e adicionadas ao projeto. A segurança é importante quando se trata a utilização da linguagem em ambientes de redes comumente encontrados nas empresas do setor. O fato de ser portátil permite a utilização do sistema em diferentes sistemas operacionais, como Linux, Windows e Mac OS.

O Projeto implementado contempla a utilização das principais funções de *taper* utilizadas no setor florestal. Outras funções podem ser implementadas com facilidade e outra possibilidade, é implementar opções para o usuário digitar uma expressão qualquer para estimar o diâmetro comercial ( $d$ ). O ambiente de programação utilizado, bem como a estrutura do projeto facilita essas implementações. A partir dos dados de *dap*, altura, altura de corte e das estimativas

geradas pelo modelo de *taper* são geradas todas as possibilidades de corte para a classe de diâmetro em questão.

A maioria dos sistemas para conversão otimizada de árvores e povoamentos florestais foi desenvolvido empregando programação dinâmica. Na maioria das vezes esses sistemas não incluem diretamente restrições de demanda, limitando algumas aplicações práticas.

O sistema desenvolvido, OtimToras, pela possibilidade de inclusão de restrições de demanda por produto, pode ser empregado diretamente no planejamento e gestão de pequenas e médias serrarias.

A proporção de produtos extraídos de uma floresta depende, de diversos fatores, com a prescrição de manejo adotada, da idade do povoamento e regime de desbastes e da espécie. A obtenção de multiprodutos da madeira ainda sofre uma grande influência das condições de mercado, como a demanda e preço dos produtos comercializáveis. Esse conjunto de situações aumenta a complexidade do problema, resultando em casos onde não há uma solução exata que possa ser atingida em um tempo aceitável.

O sistema desenvolvido neste trabalho (OtimToras) auxilia os gestores do processo de obtenção de padrões ótimos de corte visando a obtenção de multiprodutos, contudo melhorias são necessárias. Como propostas para o desenvolvimento de novos recursos para o OtimToras destacam-se:

- ✓ Consideração de diferentes modelos de *taper* por classe de diâmetro e local;
- ✓ Integração do sistema com ferramentas de cadastro e inventário florestal;
- ✓ Geração de relatórios em formato padronizado de uma maneira mais amigável ao usuário;
- ✓ Exportação dos modelos de PIM no formato MPS (*Mathematical Programming System*) e AMPL (*A Mathematical Programming Language*);
- ✓ Incorporação do otimizador matemático, para a resolução dos modelos de PIM dentro do próprio OtimToras;
- ✓ Incorporação de outras técnicas heurísticas para a solução de modelo de PIM;
- ✓ Integração com SGBD (Sistemas de Gerenciamento de Bancos de Dados), como o MySQL, Firebird, PostgreSQL, dentre outros;

## **CONCLUSÃO**

O projeto OtimToras iniciado é eficiente para otimização de multiprodutos madeireiros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e respostas**. 3rd ed. rev. e ampl.. Viçosa. Ed. UFV. 2009. 548p.

CIŽMAN, A.; URH, M. A PC-based Decision Support System for Optimal Cutting of Logs in Veneers Production. **Informatica**, v.30, p. 213–220, 2006.

ENG, G.; DAELLENBACH, H.; WHYTE, A. G. D. Bucking tree-length stems optimally. **Canadian Journal of Forest Research**, v.16, p.1030–1035, 1986.

GEERTS, J. M. P.; TWADDLE, A. A. A method to assess log value loss caused by cross-cutting practice on the skidsite. **New Zealand Journal of Forestry**, v.29, n.2, p.173–184, 1984.

HORSTMANN, C. S.; CORNELL, G. **Core Java**, Volume I – Fundamentos, 8ª edição, Pearson Prentice Hall, 2010. 383 p.

KIVINEN, V. P. A genetic algorithm approach to tree bucking optimization. **Forest Science**, v.50, n.5, p.696–710, 2004.

LEITE, H. G. **Conversão de troncos em multiprodutos de madeira, utilizando programação dinâmica**. 1994. 230 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

LEMBERSKY, M. R.; CHI, U. H. Weyerhaeuser decision simulator improves timber profits. **Interface**, v.16, n.1, p.6-15, 1986.

MARSHALL, H. D. **An investigation of factors affecting the optimal output log distribution from mechanical harvesting and processing systems**. Ph.D. thesis. Oregon State University. 211 p. 2005.

MENDOZA, G. A.; BARE, B. B. A two-stage decision model for log-bucking and allocation. **Forest Products Journal**, v.36, n.10, p.70-74, 1986.

NÄSBERG, M. **Mathematical programming model for optimal log bucking.** **Linköping Studies in Science and Technology**, Dissertation 132. Linköping. 200 p. 1985.

PICKENS, J. B.; LEE, A.; LYON, G. W. Optimal bucking of hardwoods. **Northern Journal of Applied Forestry**, v. 9, n.4, p.149–152, 1992.

PNEVMATICOS, S. M.; MANN, S. H. Dynamic programming in tree bucking. **Forest Products Journal**, v.22, n.2, p.26–30, 1972.

SESSIONS, J. Making better tree-bucking decisions in the woods. **Journal of Forestry**, v.86, n.10, p.43–45, 1988.

SESSIONS, J.; OLSEN, E. D.; GARLAND, J. J. Tree bucking for optimal stand value with log allocation constraints. **Forest Science**, v.35, n.1, p.271–276, 1989.

## CAPÍTULO 3

### SISTEMA COMPUTACIONAL PARA AJUSTE DE FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE

#### INTRODUÇÃO

O conhecimento da distribuição diamétrica de povoamentos florestais é essencial para se inferir sobre a dinâmica de crescimento e relações entre as árvores. Isto auxilia a tomada de decisão sobre intervenções a serem realizadas no povoamento, como desbaste, desrama e colheita (CAMPOS e LEITE, 2009), bem como permitir uma análise econômica mais precisa, visto que quase na totalidade dos coeficientes operacionais das operações de colheita e transporte são influenciados pelas dimensões das árvores (CLUTTER et al., 1983).

A descrição das estimativas de frequência por classe diamétrica é feita pelo emprego de funções densidade de probabilidade (*fdp*), como: Weibull, normal, log-normal, gama, Johnson's SB, beta, log-logística, Cauchy, Frechet, Erlang, Rayleigh, e hiperbólica (BINOTI, 2008; LEITE et al., 2010, BINOTI et al., 2011). A escolha de uma dessas *fdp* é determinante para a qualidade das estimativas da distribuição diamétrica futura (BINOTI, 2008).

A recuperação da distribuição de diâmetros futura se dá pela estimação dos parâmetros da *fdp* em função de características do povoamento como idade, densidade, índice de local, diâmetro mínimo e diâmetro máximo, dentre outras. Uma das etapas mais trabalhosas para a construção de um modelo de distribuição de diâmetros consiste no ajuste das *fdp* a cada parcela e medição e na seleção da melhor

função para um conjunto de dados. Como ferramentas gratuitas que permitam o ajuste de diferentes *fdp*, bem como a análise gráfica dos ajustes são escassos na área florestal idealizou-se esse trabalho.

## **OBJETIVO**

Este trabalho tem por objetivo iniciar, desenvolver, implementar e validar um projeto de construção de um sistema computadorizado para ajuste de funções densidade de probabilidade. Os objetivos específicos foram de apresentar os princípios básicos do sistema de apoio à decisão desenvolvido (FitFD – Sistema para ajuste de funções densidade de probabilidade), destacando suas características para a modelagem da distribuição de diâmetros de povoamentos florestais.

## MATERIAL E MÉTODOS

### DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O FitFD foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Java. Como ambiente de desenvolvimento foi utilizada a IDE (Integrated Development Environment) Netbeans 7.1, e a JDK 7.3 (Java Development Kit ). Os testes do sistema foram realizados em ambiente Windows. O sistema utiliza a biblioteca Michael Thomas Flanagan's Java Scientific Library para a obtenção dos parâmetros. (Disponível em <http://www.ee.ucl.ac.uk/~mflanaga/java/>).

### FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE

Para o sistema desenvolvido optou-se pela implementação das funções densidade de probabilidade descritas abaixo. Uma descrição simplificada de cada fdp pode ser encontrada em Binoti (2008).

### FUNÇÃO WEIBULL

A fdp da função Weibull de três parâmetros (3P) pode ser descrita como:

$$f(x) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^{\gamma-1} \left( \exp \left( - \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right) \right) \right\}$$

em que,  $\alpha$  o parâmetro de locação,  $\beta$  parâmetro de escala ( $\beta > 0$ ),  $\gamma$  é o parâmetro de forma ( $\gamma > 0$ ), e  $x$  é o centro de classe de diâmetro ( $x > 0$ ). A supressão do parâmetro

de locação da função caracteriza a função Weibull de dois parâmetros (2P), apresentada abaixo:

$$f(x) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( \exp \left( - \left( \frac{x}{\beta} \right)^\gamma \right) \right) \right\}$$

O parâmetro de locação pode ser substituído pelo diâmetro mínimo do povoamento ( $\alpha = dmin$ ), sendo ajustada da seguinte forma:

$$f(x) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x - dmin}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( \exp \left( - \left( \frac{x - dmin}{\beta} \right)^\gamma \right) \right) \right\}$$

A função Weibull pode ser truncada a direita em função ao diâmetro máximo do povoamento, sendo descrita da seguinte forma:

$$f(x) = \left\{ \frac{\frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( \exp \left( - \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right) \right)}{\exp \left( - \left( \frac{T - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right)} \right\}$$

em que,  $T$  é o diâmetro máximo da parcela.

## FUNÇÃO HIPERBÓLICA

A *fdp* da função hiperbólica de três parâmetros (3P) pode ser descrita como:

$$f(x) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 - \tanh \left( \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right) \right)^2 \right\}$$

em que,  $\alpha$  o parâmetro de locação,  $\beta$  parâmetro de escala ( $\beta > 0$ ),  $\gamma$  é o parâmetro de forma ( $\gamma > 0$ ), e  $x$  é o centro de classe de diâmetro ( $x > 0$ ). A supressão do parâmetro de locação da função caracteriza a função hiperbólica de dois parâmetros (2P), apresentada abaixo:

$$f(x) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 - \tanh \left( \left( \frac{x}{\beta} \right)^\gamma \right) \right)^2 \right\}$$

O parâmetro de locação pode ser substituído pelo diâmetro mínimo do povoamento ( $\alpha = dmin$ ), sendo ajustada da seguinte forma:

$$f(x) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x - dmin}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 - \tanh \left( \left( \frac{x - dmin}{\beta} \right)^\gamma \right) \right)^2 \right\}$$

A função hiperbólica pode ser truncada a direita em função ao diâmetro máximo do povoamento, sendo descrita da seguinte forma:

$$f(x) = \frac{\left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 - \tanh \left( \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right)^2 \right) \right\}}{\tanh \left( \left( \frac{T - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right)}$$

em que,  $T$  é o diâmetro máximo da parcela.

## FUNÇÃO LOG-LOGÍSTICA

A função densidade de probabilidade log-logística em sua forma completa (3P) pode ser escrita da seguinte forma:

$$f(x) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 + \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right)^{-2} \right\}$$

em que  $\alpha$  é o parâmetro de forma ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  é o parâmetro de escala ( $\beta > 0$ ), e  $\gamma$  é o parâmetro de localização. Sendo que a supressão do parâmetro de localização resulta na função log-logística de dois parâmetros (2P) e pode ser expressa da seguinte forma:

$$f(x) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 + \left( \frac{x}{\beta} \right)^\gamma \right)^{-2} \right\}$$

O parâmetro de localização pode também ser substituído pelo diâmetro mínimo da parcela ( $dapmin$ ), resultando na função log-logística com  $\gamma=dapmin$ , como expresso abaixo:

$$f(x) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x - dapmin}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 + \left( \frac{x - dapmin}{\beta} \right)^\gamma \right)^{-2} \right\}$$

## FUNÇÃO LOGÍSTICA GENERALIZADA

A função logística generalizada (Nadarajah e Kotz, 2005) que pode ser descrita como:

$$f(x) = \frac{\left( 1 + \alpha \left( \frac{x - \gamma}{\beta} \right) \right)^{-1 - \frac{1}{\alpha}}}{\beta \left( 1 + \left( 1 + \alpha \left( \frac{x - \gamma}{\beta} \right) \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \right)^2}$$

em que,  $\beta$  é o parâmetro de escala ( $\beta > 0$ ),  $\alpha$  é o parâmetro de forma ( $\alpha > 0$ ) e  $\gamma$  é o parâmetro de locação ( $\gamma > 0$ ).

### FUNÇÃO FATIGUE LIFE

A função Birnbaum-Saunders também conhecida como *fatigue life* foi proposta por Birnbaum e Saunders em (1969a e 1969b) para a descrição da fadiga causada por ações realizadas ciclicamente. A função Birnbaum-Saunders pode ser ajustada pelo método da máxima verossimilhança (BIRNBAUM e SAUNDERS 1969b), por métodos bayesianos (ACHAR, 1993) ou pelo método de momentos (NG et al. 2003, WANG et al. 2006).

A função densidade de probabilidade Birnbaum-Saunders em sua forma completa (3P) pode ser escrita da seguinte forma:

$$f(x) = \left\{ \frac{\sqrt{(x-\gamma)/\beta} + \sqrt{\beta/(x-\gamma)}}{2\alpha(x-\gamma)} \phi \left( \frac{1}{\alpha} \left( \sqrt{\frac{x-\gamma}{\beta}} - \sqrt{\frac{\beta}{x-\gamma}} \right) \right) \right\}$$

em que  $\alpha$  é o parâmetro de forma ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  é o parâmetro de escala ( $\beta > 0$ ),  $\gamma$  é o parâmetro de locação, e  $\phi$  é a função normal padrão que pode ser escrita como:

$$\phi = \frac{e^{-x^2/2}}{\sqrt{2\pi}}$$

Sendo que a supressão do parâmetro de locação resulta na função Birnbaum-Saunders de 2P e pode ser expressa da seguinte forma:

$$f(x) = \left\{ \frac{\sqrt{x/\beta} + \sqrt{\beta/x}}{2\alpha x} \phi \left( \frac{1}{\alpha} \left( \sqrt{\frac{x}{\beta}} - \sqrt{\frac{\beta}{x}} \right) \right) \right\}$$

### FUNÇÃO FRECHET

A função densidade de probabilidade Frechet em sua forma completa (3P) pode ser escrita da seguinte forma:

$$f(x) = \left\{ \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{\beta}{x-\gamma} \right)^{(\alpha+1)} \left( \exp \left( - \left( \frac{\beta}{x-\gamma} \right)^\alpha \right) \right) \right\}$$

em que  $\alpha$  é o parâmetro de forma ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  é o parâmetro de escala ( $\beta > 0$ ),  $\gamma$  é o parâmetro de localização. Sendo que a supressão do parâmetro de localização resulta na função Frechet de 2P e pode ser expressa da seguinte forma:

$$f(x) = \left\{ \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{\beta}{x} \right)^{(\alpha+1)} \left( \exp \left( - \left( \frac{\beta}{x} \right)^\alpha \right) \right) \right\}$$

## RESULTADOS

O sistema computacional desenvolvido foi denominado FitFD – Sistema para Ajuste de Funções Densidade de Probabilidade, foi desenvolvido visando tornar-se o mais amigável possível ao usuário, admitindo certa flexibilidade na escolha das *fdp* cadastradas, amplitudes de classes, bem como uma visualização dinâmica dos resultados. A estrutura do sistema é relativamente simples baseia-se na importação das informações de diâmetro observadas em campo, processamento e ajuste das *fdp*, análise gráfica e exportação dos parâmetros das *fdp*, bem como das estimativas por classe de diâmetro. As principais características e interfaces do sistema são apresentadas abaixo. A tela inicial do FitFD é apresentada na Figura 1.

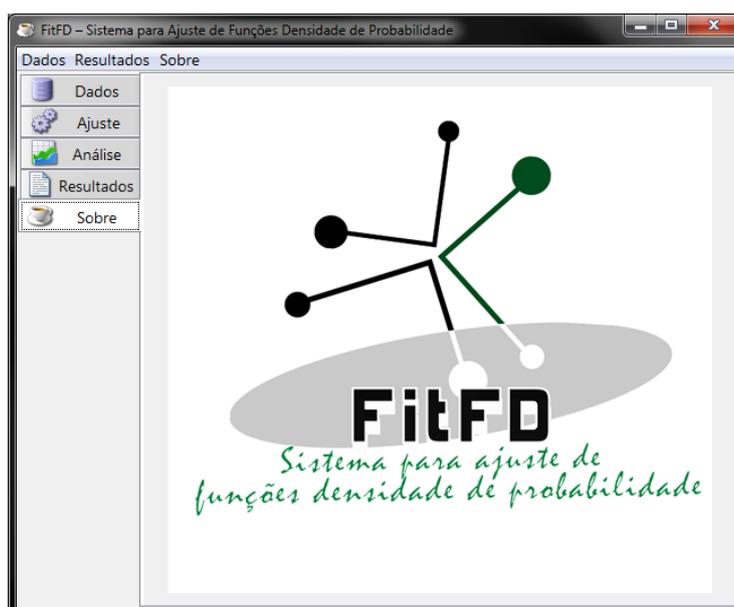
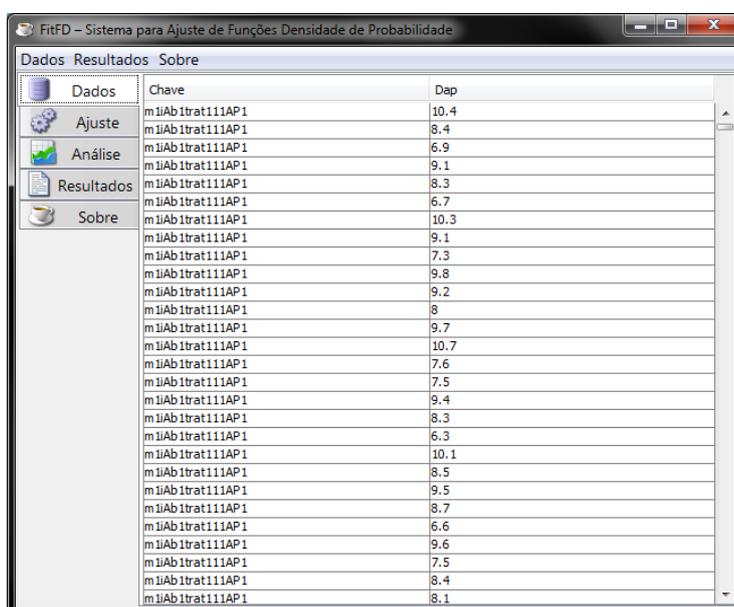


Figura 1: Tela inicial do FitFD.

## ENTRADA DE DADOS E INFORMAÇÕES

### DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS

As informações básicas relacionadas as classes de diâmetro são inseridas na aba Dados (Figura 2). As informações necessárias para o ajuste das fdp são fornecidas em função de uma chave primária, que pode ser em função da parcela, talhão ou qualquer outra unidade administrativa. O usuário pode usar qualquer combinação de campos de cadastro para definição da chave primária, resultando em uma solução genérica para fins de estratificação e ajuste de funções.



The screenshot shows the 'FitFD - Sistema para Ajuste de Funções Densidade de Probabilidade' window. The 'Dados' tab is active, displaying a table with two columns: 'Chave' and 'Dap'. The 'Chave' column contains the identifier 'mIiAb1trat111AP1' repeated 20 times. The 'Dap' column contains numerical values ranging from 6.3 to 10.7.

Chave	Dap
mIiAb1trat111AP1	10.4
mIiAb1trat111AP1	8.4
mIiAb1trat111AP1	6.9
mIiAb1trat111AP1	9.1
mIiAb1trat111AP1	8.3
mIiAb1trat111AP1	6.7
mIiAb1trat111AP1	10.3
mIiAb1trat111AP1	9.1
mIiAb1trat111AP1	7.3
mIiAb1trat111AP1	9.8
mIiAb1trat111AP1	9.2
mIiAb1trat111AP1	8
mIiAb1trat111AP1	9.7
mIiAb1trat111AP1	10.7
mIiAb1trat111AP1	7.6
mIiAb1trat111AP1	7.5
mIiAb1trat111AP1	9.4
mIiAb1trat111AP1	8.3
mIiAb1trat111AP1	6.3
mIiAb1trat111AP1	10.1
mIiAb1trat111AP1	8.5
mIiAb1trat111AP1	9.5
mIiAb1trat111AP1	8.7
mIiAb1trat111AP1	6.6
mIiAb1trat111AP1	9.6
mIiAb1trat111AP1	7.5
mIiAb1trat111AP1	8.4
mIiAb1trat111AP1	8.1

Figura 2: Tela de manipulação dos dados no FitFD.

### ESCOLHA DAS FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE

Após a importação dos dados deve-se definir as funções a serem ajustadas. As funções disponíveis na versão atual do sistema são Weibull 2 Parâmetros, Weibull 3 Parâmetros, Weibull 2 Parâmetros-locação = DapMin, Weibull 3 Parâmetros Truncada à direita, Hiperbólica 2 Parâmetros, Hiperbólica 3 Parâmetros, Hiperbólica 2 Parâmetros-locação = DapMin, Hiperbólica 3 Parâmetros Truncada, Log-Logística 2 Parâmetros, Log-Logística 3 Parâmetros, Log-Logística 2 Parâmetros-locação = DapMin, Logística Generalizada, Fatigue Life 2 Parâmetros, Fatigue Life 3 Parâmetros, Frechet 2 Parâmetros, Frechet 3 Parâmetros. Pela natureza e ambiente de

programação do FitFD, outras funções podem ser implementadas com facilidade e esforços computacionais insignificantes. O sistema permite também o agrupamento dos dados em classes definidas pelo usuário.

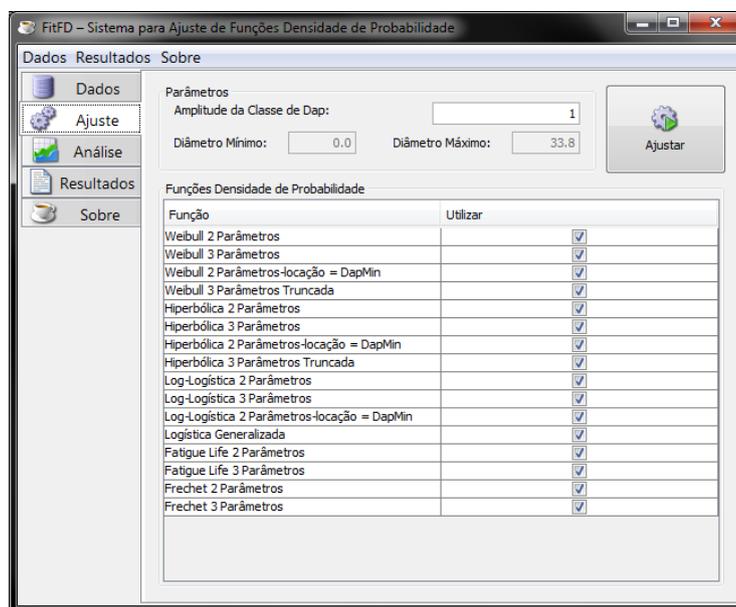


Figura 3: Tela de definição dos modelos de *taper*.

## ANÁLISE DOS AJUSTES

Após o ajuste das funções pode-se verificar os valores estimados para classe de diâmetro na aba “Análise” (Figura 4). A análise gráfica entre valores observados e estimados pode ser observada para todas as funções e parcelas (Figura 5), esse fato permite a escolha e análise detalhadas das fdp disponíveis. O resultados podem ser exportados para outros sistemas como o Microsoft Excel, onde outras análises específicas podem ser conduzidas. Conforme Figura 6, o sistema gera um banco de dados contendo a chave primária e as estimativas dos parâmetros das funções escolhidas. O usuário pode, então correlacionar a chave primária e prosseguir com estudos específicos com o ajuste de modelos de distribuição de diâmetros.

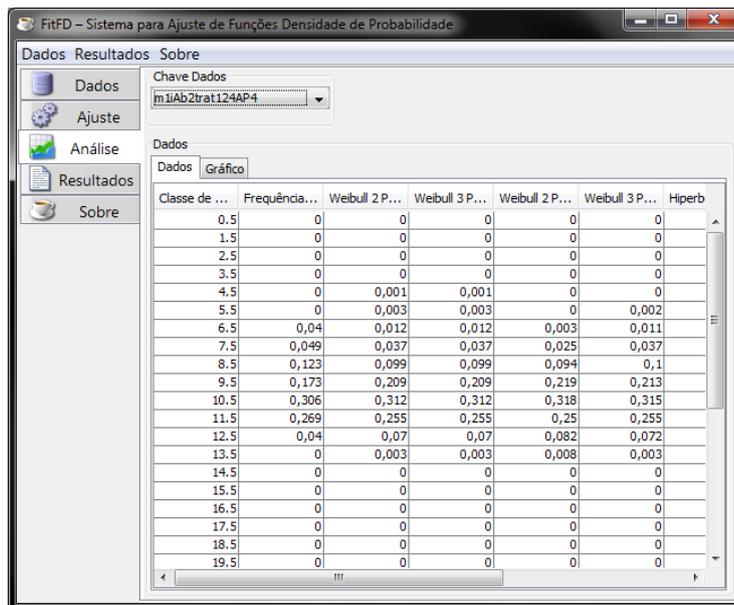


Figura 4: Tela de análise entre valores observados e estimados pelo FitFD.

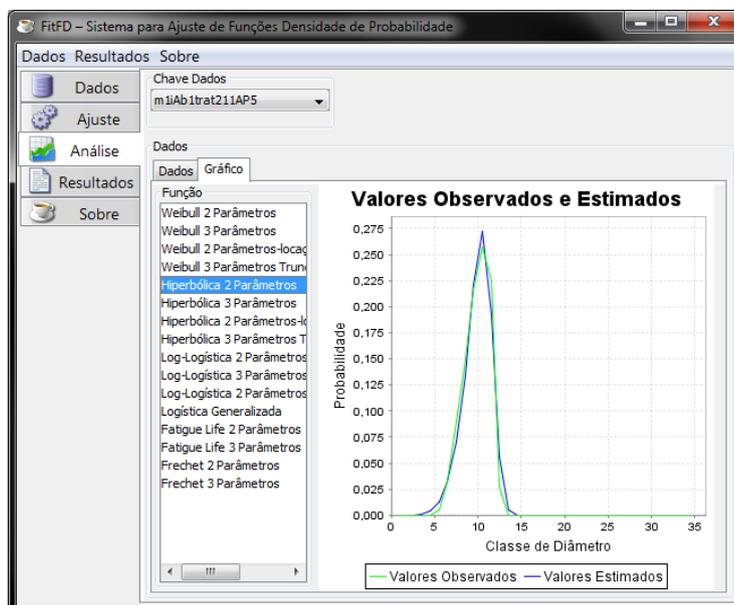


Figura 5: Tela de análise de análise gráfica entre valores observados e estimados.

## RESULTADOS DOS AJUSTES

Na aba “Resultados” pode-se observar os parâmetros de cada função ajustada pelo sistema (Figura 6). Os parâmetros estimados, bem como as estimativas por classe de diâmetro podem ser exportadas no menu “Resultados”.

FitFD – Sistema para Ajuste de Funções Densidade de Probabilidade							
Dados Resultados Sobre							
Dados	Parcela	Weibull 2P ...	Weibull 2P ...	Weibull 3P ...	Weibull 3P ...	Weibull 3P ...	Weibull 2P
	m1Ab1trat1...	8.04602140...	10.6315277...	8.04601594...	10.6315716...	1.17344590...	8.0460214
	m1Ab1trat1...	8.42366629...	10.6700983...	8.42362476...	10.6700991...	1.45797057...	8.4236663
	m1Ab2trat1...	7.99341867...	10.2956467...	7.99345801...	10.2956542...	1.87759928...	4.0942974
	m1Ab2trat1...	9.36584017...	10.8777369...	9.36581197...	10.8777395...	6.69471909...	4.9594438
	m1Ab1trat2...	7.69418055...	10.5765731...	7.69397003...	10.5765633...	2.27409463...	3.9787223
	m1Ab1trat2...	7.37490512...	10.7034075...	7.37503588...	10.7035051...	5.66682097...	4.1855951
	m1Ab2trat2...	8.95311144...	10.3628630...	8.95316898...	10.3628601...	1.52431339...	4.3863764
	m1Ab2trat2...	9.71164442...	10.9807882...	9.71160004...	10.9807862...	7.09660959...	6.6005830
	m1Ab1trat3...	8.49291496...	10.5783710...	8.49259752...	10.5784148...	1.38962573...	5.4909970
	m1Ab1trat3...	7.44104629...	10.4750518...	7.44106595...	10.4750567...	1.41507160...	5.2590131
	m1Ab2trat3...	10.6139461...	10.7205447...	10.6139528...	10.7205458...	3.03864532...	7.6422615
	m1Ab2trat3...	10.0359367...	10.8487700...	10.0359420...	10.8487693...	5.66912455...	5.8053894
	m1Ab1trat4...	7.59635970...	10.1909962...	7.59635863...	10.1909954...	2.74920500...	3.7007081
	m1Ab1trat4...	7.33014957...	10.5469000...	7.33015349...	10.5468979...	2.77651442...	5.6312987
	m1Ab2trat4...	8.79599479...	10.6486629...	8.79600241...	10.6486620...	1.64901667...	4.3670313
	m1Ab2trat4...	9.94510901...	11.1120383...	9.94489320...	11.1119417...	9.05615732...	8.3251960
	m1Eb1trat1...	8.50978035...	10.6902286...	8.50975570...	10.6902304...	7.59381590...	4.5149669
	m1Eb1trat1...	8.79178837...	10.5755034...	8.79176700...	10.5755050...	2.08796474...	4.5931318
	m1Eb2trat1...	10.5853792...	10.5637755...	10.5852676...	10.5637332...	1.31835402...	5.5491646
	m1Eb2trat1...	9.92013211...	10.4404196...	9.92023598...	10.4404330...	1.96071427...	4.9457488
	m1Eb1trat2...	9.81302579...	10.8389950...	9.81299703...	10.8389968...	1.60705211...	5.0945278
	m1Eb1trat2...	7.83612185...	10.4701618...	7.83585877...	10.4702463...	3.44274995...	4.0026321
	m1Eb2trat2...	10.2574946...	10.4962182...	10.2575199...	10.4962164...	5.45704127...	5.4480496
	m1Eb2trat2...	8.59633368...	10.6500509...	8.59632481...	10.6500542...	7.39502223...	4.5467883
	m1Eb1trat3...	8.52003588...	10.8997070...	8.52004078...	10.8997025...	1.29079240...	4.9194641
	m1Eb1trat3...	9.19427886...	10.6597608...	9.19419897...	10.6597596...	2.01000278...	4.8179907
	m1Eb2trat3...	8.14675181...	10.7048317...	8.14696061...	10.7048339...	7.71099751...	4.2162119

Figura 6: Resultados obtidos para cada parcela a função cadastrada.

## DISCUSSÃO

Este trabalho visou desenvolver, implementar e validar um projeto de construção de um sistema computadorizado, para modelagem da distribuição de diâmetros de povoamentos florestais. Esse trabalho apresentou como objetivos específicos os princípios básicos do sistema de apoio à decisão desenvolvido (FitFD – Sistema para ajuste de funções densidade de probabilidade), destacando suas características para a modelagem da distribuição de diâmetros de povoamentos florestais. A principal característica do sistema é poder ser utilizado livremente por gestores florestais, acadêmicos e extensionistas no ajuste de funções densidade de probabilidade e construção de modelos de distribuição de diâmetros.

O projeto foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Java. Essa linguagem foi escolhida pelo fato de ser uma linguagem simples, orientado a objetos, ser robusta, segura, neutro em relação à arquitetura, portátil, interpretado, alto desempenho, múltiplos threads, dinâmica, dentre outras características (HORSTMANN e CORNELL, 2009). Dentre as principais características destaca-se o fato de ser simples permite a continuidade do projeto por outros estudantes de graduação, pós-graduação, professores ou profissionais do ramo. O fato de ser orientado a objetos permite que futuras alterações possam ser facilmente implementadas e adicionadas ao projeto, sem a inferência nas funções já disponíveis.

O sistema desenvolvido pode ser empregado com propósito de construção de modelos de diâmetros e em qualquer pesquisa que envolva descrição da estrutura horizontal dos povoamentos, equiâneos e inequiâneos.

O sistema desenvolvido neste trabalho auxilia os usuários na definição e escolha de fdp que melhor atendam suas necessidades, contudo melhorias são

necessárias. Como propostas para o desenvolvimento de novos recursos para o FitFD destacam-se:

- ✓ Permitir uma maior eficiência na manipulação dos dados observados, facilitando estratificações e junções de estratos dentro do sistema;
- ✓ Integração do sistema com ferramentas de cadastro e inventário florestal, tornando o sistema mais versátil e dinâmico;
- ✓ Geração de relatórios em formato padronizado de uma maneira mais amigável ao usuário;
- ✓ Integração com SGBD (Sistemas de Gerenciamento de Bancos de Dados), como o MySQL, Firebird, PostgreSQL, dentre outros, permitindo a exportação e publicação de informações em bancos de dados corporativos;
- ✓ Melhorar a ferramenta de análise gráfica, permitindo a visualização de várias funções em um mesmo gráfico;

## **CONCLUSÃO**

O projeto iniciado é eficiente para ajustes de funções densidade de probabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHAR, J. A. Inference for Birnbaum–Saunders fatigue life model using Bayesian method. **Computational Statistic Data Analysis**, v.15, p.367–380, 1993.

BINOTI, D. H. B. **Funções densidade de probabilidade para a descrição da distribuição diamétrica de povoamentos desbastados de *Tectona grandis***. 2008. 42 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; FARDIN, L. P.; OLIVEIRA, J. C. Probability density functions for description of diameter distribution in thinned stands of *Tectona grandis*. **Cerne**, v.18, p.185-196, 2012.

BIRNBAUM, Z. W.; SAUNDERS, S. C. A new family of life distributions. **Journal of Applied Probability**, v.6, p.319-327. 1969a.

BIRNBAUM, Z. W.; SAUNDERS, S. C. Estimation for a family of life distributions with applications to fatigue. **Journal of Applied Probability**, v.6, p.328- 347. 1969b.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber Management: A Quantitative Approach**. Wiley. 1983.

HORSTMANN, C. S.; CORNELL, G. **Core Java**, Volume I – Fundamentos, 8ª edição, Pearson Prentice Hall, 2010, 383 p.

LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; GUIMARÃES, D. P.; SILVA, M. L. M.; GARCIA, S. L. R. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.34, n.2, p.305-311, 2010.

NADARAJAH, S.; KOTZ, S. A Generalized logistic distribution. **International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences**, v.19, p.3169–3174. 2005.

NG, H. K. T.; KUNDU, D.; BALAKRISHNAN, N. Modified moment estimation for the two-parameter Birnbaum–Saunders distribution. **Computational Statistic Data Analysis**, v.43, p.283–298, 2003.

WANG, Z. H.; DESMOND, A. F.; LU, X. W. Modified censored moment estimation for the two-parameter Birnbaum–Saunders distribution. **Computational Statistic Data Analysis**, v.4, p.1033–1051, 2006.

## **CAPÍTULO 4**

### **SISTEMA COMPUTACIONAL PARA SELEÇÃO DE DADOS PARA MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO FLORESTAL**

#### **INTRODUÇÃO**

O manejo florestal visando à produção de madeira requer o uso de abordagens empíricas ou estatísticas para a obtenção de estoques de crescimento e colheita, tendo como base em variáveis como índice de local, densidade, material genético, dentre outras.

A construção de modelos de crescimento e produção envolve atividades desde a obtenção dos dados, pela medição direta e indireta de árvores, amostragem pelo lançamento de parcelas, consistência e análise dos dados obtidos, bem como o ajuste de modelos e obtenção de equações. Técnicas matemáticas, estatísticas, e computacionais são fundamentais para a construção e obtenção das estimativas de crescimento e produção.

As estimativas dos modelos de crescimento e produção são influenciadas pela qualidade da amostra e das propriedades estatísticas dos modelos utilizados, bem como sua forma de utilização e obtenção (CAMPOS e LEITE, 2009). Diversos trabalhos envolvendo técnicas e metodologias de modelagem do crescimento e produção podem ser encontrados na literatura (CLUTTER et al., 1983; CAMPOS e LEITE, 2009; BINOTI, 2010). Entretanto na maior parte desses trabalhos foram utilizados dados oriundos de parcelas de inventário florestal contínuo (IFC) obtido de forma aleatória.

A utilização de dados de inventário florestal para a construção de modelos de crescimento e produção é uma alternativa à inexistência de parcelas de prognose (parcelas específicas para modelagem do crescimento e da produção) na maioria das empresas brasileiras. Esse fato pode resultar em grande frequência de informações em torno da média e pouca representatividade nas extremas de produtividade. Apesar disso, a seleção de parcelas em um banco de dados de IFC é uma alternativa viável para a obtenção de parcelas em todas as classes de produtividade (BEZERRA, 2009).

A amostragem seletiva de parcelas pode garantir a representatividade de todas as classes de produtividade. Contudo o processo prévio de obtenção aleatória das parcelas pode ser ineficiente, não garantindo a obtenção de um modelo representativo da região.

Processos de busca heurística podem ser utilizados para a definição das parcelas para ajuste de modelos que apresentem as melhores estimativas para todos os dados. Entretanto a utilização desse processo é prejudicada pela inexistência de ferramentas computacionais que auxiliem nessa tarefa, por isso, foi idealizado o presente estudo.

## **OBJETIVO**

O objetivo deste estudo foi de iniciar, desenvolver, implementar e validar um projeto de construção de um sistema computadorizado, para auxiliar os gestores florestais, acadêmicos e extensionistas na seleção ideal de parcelas para a construção de modelos de crescimento e produção. Com objetivos específicos: apresentar os princípios básicos do sistema de apoio à decisão desenvolvido (Select – Sistema para a seleção de parcelas para a modelagem do crescimento e produção), destacando suas características para a modelagem do crescimento e produção florestal.

## MATERIAL E MÉTODOS

O Select foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Java. Como ambiente de desenvolvimento foi utilizada a IDE (Integrated Development Environment) Netbeans 7.1, e a JDK 7.3 (Java Development Kit ). Os testes do sistema foram realizados em ambiente Windows. O sistema utiliza a biblioteca Michael Thomas Flanagan's Java Scientific Library para a obtenção dos parâmetros. (Disponível em <http://www.ee.ucl.ac.uk/~mflanaga/java/> acesso 27/03/2012).

Para a estimação da produção utilizou-se os seguintes modelos:

$Volume = \frac{a}{(1+b * e^{(-c * Idade)})}$	Logística
$Volume = a - b * e^{(-c * Idade^d)}$	Weibull
$Volume = e^{(a + b/Idade)}$	Schumacher
$Volume = \frac{a}{(1+e^{(b-c * Idade)})^{1/d}}$	Richards
$Volume = a * e^{(-e^{(b-c * Idade)})}$	Gompertz
$Volume = a * e^{(b/Idade)}$	Exponencial Modificado
$Volume = a * \tanh(b * (Idade - c)^d)$	Hiperbólica

em que, a, b, c e d, são os coeficientes do modelo.

O modelo matemático para seleção de parcelas possui como objetivo a minimização da soma de quadrados de resíduos total (SQRT). Da forma como foi projetado, o processo de seleção pode ser feito pela busca aleatória de parcelas, bem como com a utilização da meta-heurística algoritmo genético. A busca aleatória consiste na escolha aleatória das parcelas, ajuste do modelo utilizando as parcelas selecionadas e aplicação da equação obtida em todos os dados, obtendo a SQRT. Se

alguma combinação de parcelas apresentar um valor de SQRT menor que o ajuste obtido com todos os dados esta combinação é armazenada. O processo é repetido até atingir o limite de iterações desejadas, sendo que o melhor ajuste obtido é alterado a cada melhoria na solução do problema. O algoritmo pode ser descrito assim:

- 1: MelhorSol  $\leftarrow$  solução obtida com todos os dados;
- 2: **Repetir**
- 3: S  $\leftarrow$  solução candidata gerada aleatoriamente
- 4: Se  $\text{SQRT}(S) < \text{SQRT}(\text{MelhorSol})$  então
- 5: MelhorSol  $\leftarrow$  S
- 6: **Até** atingir o número máximo de interações
- 7: **Retornar** MelhorSol

Algoritmos genéticos baseiam nos princípios da evolução natural, para encontrar uma ótima solução para um problema de otimização. Um conjunto de soluções compõe a população. A população sofre um processo chamado de reprodução, pelo qual a população atual é transformada em uma nova população. Essa transformação ocorre por meio de seleção, recombinação (*crossover*) e mutação. Essas transformações dependem da qualidade de cada indivíduo como solução do problema em questão chamada avaliação (aptidão ou *fitness*) e vão gerar um processo evolutivo, que eventualmente deverá encontrar uma boa solução, para o problema em questão (LINDEN, 2008).

Neste estudo o algoritmo genético foi implementado com o intuito de proporcionar ao usuário diversas possibilidades e combinações para escolha de seus parâmetros. A população pode ser utilizada pelas estratégias, clássica, elitismo, estratégia ( $\mu + k$ ), e *steady state*. O operador de *crossover* pode ser de um ponto, dois pontos, ou uniforme, podendo ter sua probabilidade de ocorrência definida como constante ou com decréscimo linear. O operador de mutação pode utilizar taxa constante ou crescente de probabilidade de ocorrência. O processo de seleção pode ser do tipo roleta viciada, torneio, truncada, *ranking* e amostragem estocástica uniforme. A estrutura geral do algoritmo é apresentada na Figura 1.

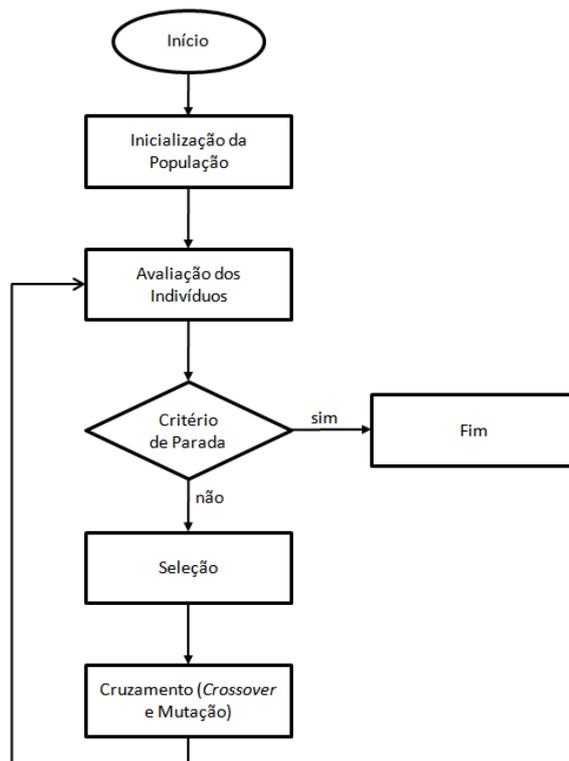


Figura 1: Esquema geral do algoritmo genético implementado.

## RESULTADOS

O sistema computacional denominado por Select (Sistema para a seleção de parcelas para modelagem do crescimento e produção) foi desenvolvido visando tornar-se o mais amigável possível ao usuário, admitindo certa flexibilidade na escolha de modelos de crescimento e produção utilizados e algoritmos, e uma consistente visualização dos resultados obtidos. A tela inicial do software é apresentada na Figura 2.

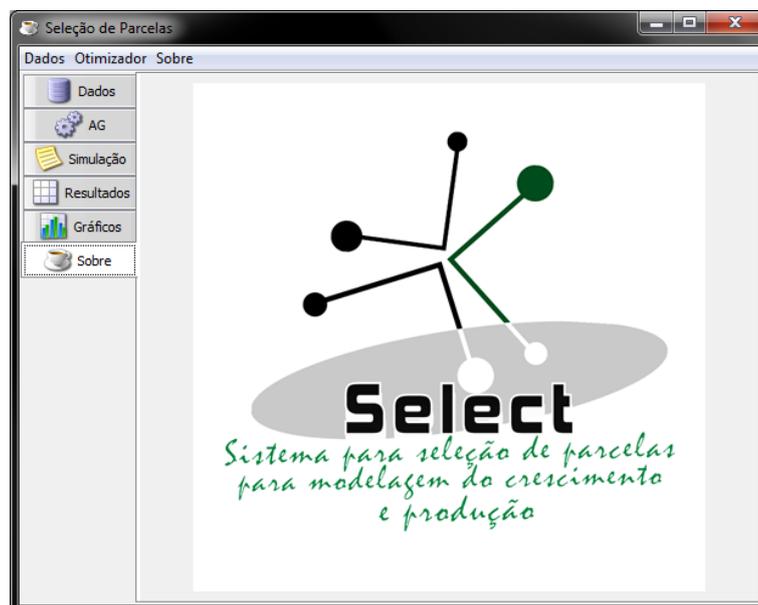


Figura 2: Tela inicial do sistema desenvolvido.

No menu “Dados” são importados os dados para processamento. Após a importação os dados são apresentados na aba “Dados” (Figura 3). Os dados devem ser importados a partir de arquivos de texto com as colunas “Parcelas”, “Idade” e “Volume”.

Parcela	Idade	Volume
2542	22.44	43.07
2542	34.56	128.39
2542	46.52054786	208.951087
2542	59.93424797	264.870869
2542	71.44109345	328.79202
2542	84.88767242	357.41505
2542	97.34794235	436.441439
2541	22.44	52.13
2541	34.56	136.32
2541	46.52054786	205.597538
2541	59.93424797	238.640279
2541	71.44109345	290.779907
2541	84.88767242	316.143995
2541	97.34794235	383.805485
2539	25.2	57.59
2539	37.32	150.72
2539	49.28219033	236.07575
2539	62.69589043	281.297877
2539	74.20274162	343.253727
2539	87.64931488	364.712653
2539	100.1095848	420.678111
2540	22.68	46.14
2540	34.68	140.61
2540	46.6849308	218.842727
2540	60.0986309	273.616614
2540	71.60548211	321.650201

Figura 3: Apresentação dos dados importados para o sistema.

Na aba “Simulação” pode ser escolhido o modelo a ser ajustado para a descrição dos dados importados. Dentre os modelos cadastrados estão o modelo logística, Weibull, Schumacher, Richards, Gompertz, exponencial modificado, e hiperbólica. No menu “Otimizador” pode ser escolhido o método de otimização a ser utilizado (busca aleatória ou algoritmos genéticos). Caso a busca aleatória seja escolhida o número de simulações pode ser definido no campo texto “Simulações” (Figura 4). Na área de texto são apresentados os valores de SQR obtidos a cada geração do AG ou busca aleatória.

Modelo

- Logística
- Weibull
- Schumacher
- Richards
- Gompertz
- Exponencial Modificado
- Hiperbólica

Análise

SQR Total

SQR Total - Seleção

Simulações

Simulações

Otimizador

Figura 4: Tela de escolha do modelo a ser utilizado.

Na Aba “AG” são definidos os principais parâmetros do algoritmo. Na aba “Parâmetros” são definidos os parâmetros e critérios de parada do algoritmo (Figura 5). Na aba “População” são definidos os características da população (Figura 6). Os operadores genéticos são definidos na aba “Operadores Genéticos” (Figura 7). O processo de seleção pode ser selecionado na aba “Seleção” (Figura 8). Os resultados do processamento são apresentados na aba resultados.

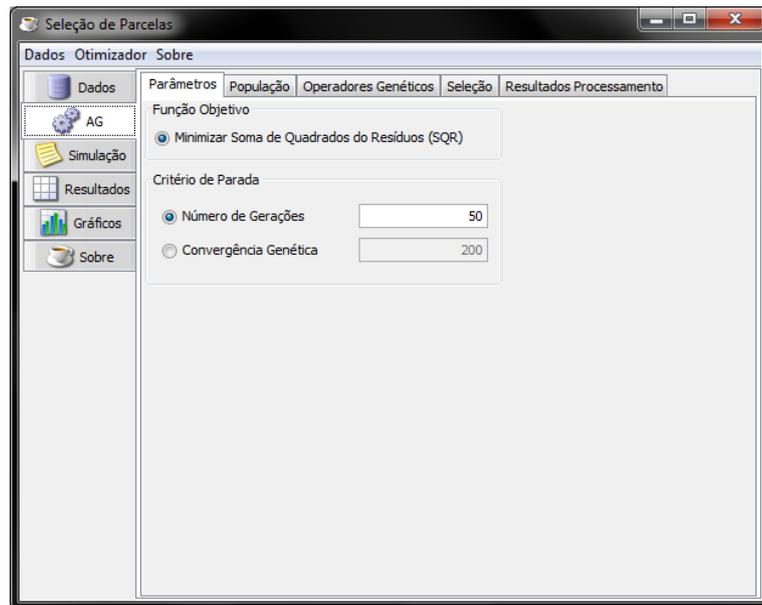


Figura 5: Seleção dos parâmetros do Algoritmo genético.

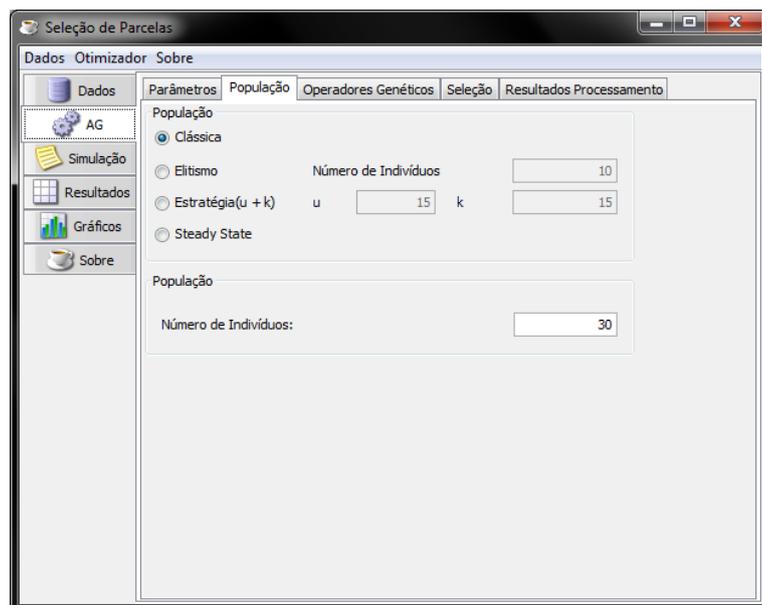


Figura 6: Definição das características da população utilizada.

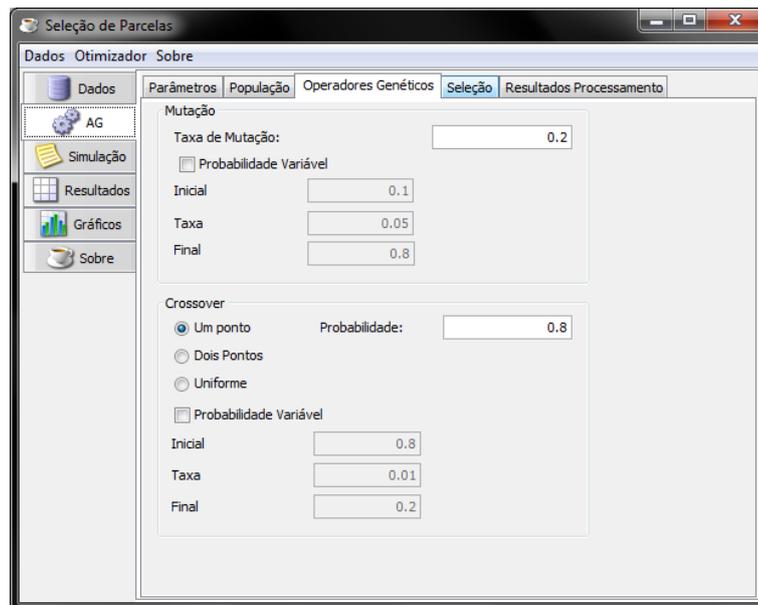


Figura 7: Definição do processo de reprodução.

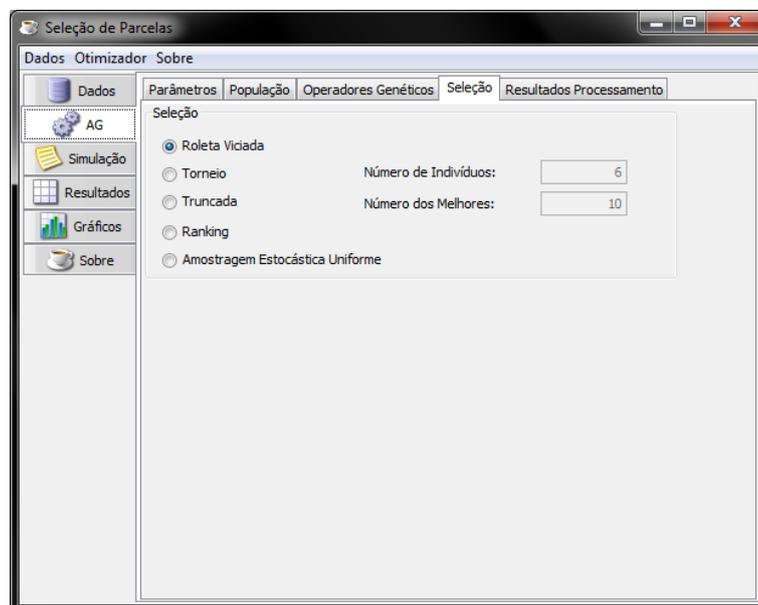


Figura 8: Tela de definição dos processos de seleção que podem ser adotados.

Os resultados do processamento de seleção de parcelas são apresentados na aba “Resultados”. Os resultados apresentam os valores estimados pelo ajuste de todas as parcelas e os valores estimados pelo ajuste aos dados de parcelas selecionadas (Figura 9).

Parcela	Idade	Volume Observado	Volume Estimado-Todos...	Volume Estimado-Seleção
2542	22.44	43.07	42.01093897319715	40.952659245412505
2542	34.56	128.39	117.51193161795142	116.74898902559427
2542	46.520...	208.951087	191.7476487884503	192.23350069995428
2542	59.934...	264.870869	263.1767083043998	265.3912431690079
2542	71.441...	328.79202	314.09808497328874	317.777646234943
2542	84.887...	357.41505	363.4500026214375	368.70024370943537
2542	97.347...	436.441439	401.37049447726906	407.91560003824856
2541	22.44	52.13	42.01093897319715	40.952659245412505
2541	34.56	136.32	117.51193161795142	116.74898902559427
2541	46.520...	205.597538	191.7476487884503	192.23350069995428
2541	59.934...	238.640279	263.1767083043998	265.3912431690079
2541	71.441...	290.779907	314.09808497328874	317.777646234943
2541	84.887...	316.143995	363.4500026214375	368.70024370943537
2541	97.347...	383.805485	401.37049447726906	407.91560003824856
2539	25.2	57.59	57.92624495419125	56.80310386258767
2539	37.32	150.72	135.28502851245247	134.7568165348808
2539	49.282...	236.07575	207.56876168471484	208.39966719270802
2539	62.695...	281.297877	276.22013461858063	278.7934148339776
2539	74.202...	343.253727	325.05471760322985	329.0709816760682
2539	87.649...	364.712653	372.43833798639207	377.98894840809396
2539	100.10...	420.678111	408.9268342094849	415.7383624682477
2540	22.68	46.14	43.335309653794695	42.26789367315738
2540	34.68	140.61	118.28887035321229	117.5351892234691
2540	46.684...	218.842727	192.70526636414104	193.21132288031518
2540	60.098...	273.616614	263.96841001892994	266.20437605873127
2540	71.608...	321.650201	314.7621224123004	318.46201674610484

Figura 9: Tela com os resultados estimados e observados.

Na aba “Gráficos” são apresentados os gráficos de valores observados x estimados, gráfico de resíduos, e histograma de resíduos, para ambos os modelos ajustados com todos os dados ou com parte das parcelas selecionadas (Figura 10).

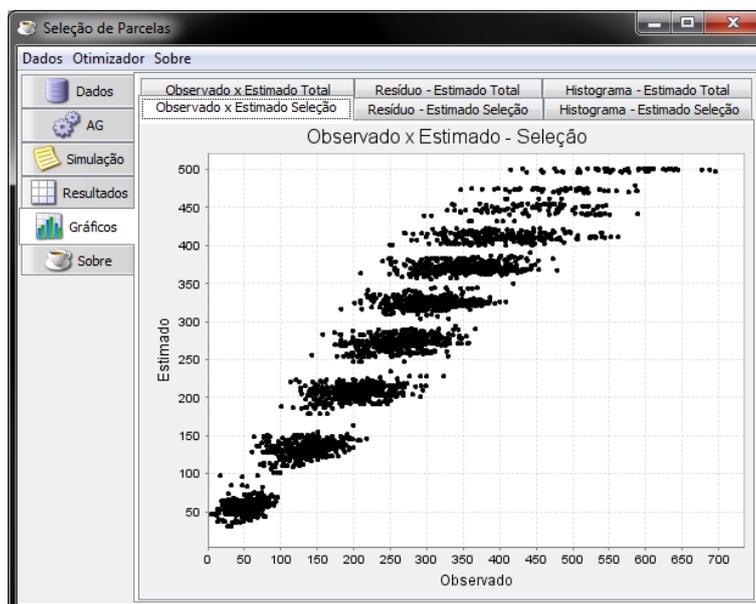


Figura 10: Tela com gráficos gerados para análise dos ajustes.

## DISCUSSÃO

Este trabalho visou desenvolver, implementar e validar um projeto de construção de um sistema computadorizado, para seleção de parcelas para a construção de modelos de crescimento e produção florestal. Esse trabalho apresentou como objetivos específicos os princípios básicos do sistema de apoio à decisão desenvolvido (Select – Sistema para a seleção de parcelas para a modelagem do crescimento e produção), destacando suas características para a seleção de parcelas. A principal característica do sistema é poder ser utilizado livremente por gestores florestais, acadêmicos e extensionistas na seleção de parcelas para o ajuste de modelos de crescimento e produção florestal.

O software possui como princípio de ser livre. Entende-se como Software Livre o software disponível para ser usado, copiado, e distribuído, por qualquer pessoa, seja na sua forma original ou com modificações, seja gratuitamente ou com custo (HEXSEL, 2002). Como principais vantagens da utilização dos sistemas livres cabem destacar:

- ✓ Baixo custo social - os softwares desenvolvidos apontam para o benefício do usuário, sendo os frutos obtidos do seu desenvolvimento disponíveis para toda a sociedade;
- ✓ Independência de fornecedor – o futuro do sistema não se depende somente de seu criador ou idealizador.
- ✓ Não fica refém da tecnologia proprietária – As alterações bruscas de funcionalidades ou descontinuidade no sistema influenciado por critérios econômicos não se aplicação a esses sistemas.

- ✓ Custo de aquisição baixo ou inexistente – a maioria dos sistemas livres é distribuída sem custo, ou com taxas insignificantes.
- ✓ Não obsolescência de hardware – A maioria dos softwares proprietários possui uma acelerada obsolescência de hardware. Isso se deve que a cada nova versão lançada novas funcionalidades são adicionadas exigindo uma adequação do hardware. Na maioria dos casos as funcionalidades adicionadas são apenas cosméticas ou utilizadas por uma pequena fatia de usuários, esse fato acarreta um aumento nas exigências do sistema por recursos de hardware. Este processo em parte se deve a pressões de marketing e econômicas, que são inexistentes nos sistemas livres.
- ✓ Robustez e segurança – Essa é uma das principais características dos sistemas livres, por ser avaliados, desenvolvidos e testados principalmente no meio acadêmico.
- ✓ Possibilidade de adequação de aplicativos – os softwares livres podem ser adequados facilmente a características específicas.
- ✓ Suporte gratuito – A maioria dos sistemas livres possuem comunidades de suporte de seus programas.

O projeto foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Java. Essa linguagem foi escolhida pelo fato de ser uma linguagem simples, orientado a objetos, ser robusta, segura, neutro em relação à arquitetura, portátil, interpretado, alto desempenho, múltiplos threads, dinâmica, dentre outras características (HORSTMANN e CORNELL, 2009). Dentre as principais características destaca-se o fato de ser simples permite a continuidade do projeto por outros estudantes de graduação, pós-graduação, professores ou profissionais do ramo. O fato de ser orientado a objetos permite que futuras alterações possam ser facilmente implementadas e adicionadas ao projeto, sem a inferência nas funções já disponíveis.

O sistema desenvolvido neste trabalho auxilia os usuários na definição e escolha e seleção das parcelas que apresentem o melhor ajuste do modelo escolhido. Este tipo de aplicação é importante quando se pretende substituir um conjunto de parcelas de inventário florestal contínuo por um conjunto, bem menos, de parcelas permanentes para fins de modelagem. Nesse caso, os locais onde se encontram as parcelas definidas pelo *Select* seriam pontos de amostragem para instalação das parcelas de prognose. Uma maior eficiência pode ser conseguida, ainda com uma pré-estratificação, com base em características como tipo de solo, espaçamento,

materiais genéticos e regime de corte, seguida da aplicação do *Select*. A implementação de modelos de predição nesta primeira versão do sistema não limita o emprego do mesmo. Isto porque, conforme Campos e Leite (2009), uma das abordagens para modelagem de crescimento e produção, é uma estratificação máxima possível e ajustar modelos de predição específicos para cada pequeno estrato. Esses modelos, conforme esses autores podem ser posteriormente transformados em modelos de projeção. Os estratos nesse caso podem ser definidos com base nas características citadas.

Como propostas para o desenvolvimento de novos recursos para o *Select* destacam-se:

- ✓ Permitir uma maior eficiência na manipulação dos dados observados;
- ✓ Integração do sistema com ferramentas de cadastro e inventário florestal, tornando o sistema mais versátil e dinâmico;
- ✓ Geração de relatórios em formato padronizado de uma maneira mais amigável ao usuário;
- ✓ Integração com SGBD (Sistemas de Gerenciamento de Bancos de Dados), como o MySQL, Firebird, PostgreSQL, dentre outros, permitindo a exportação e publicação de informações em bancos de dados corporativos;
- ✓ Definição de estratificações pelo próprio algoritmo;
- ✓ Implementação de outras meta-heurísticas de busca.
- ✓ Utilização de modelos mais sofisticados.

## **CONCLUSÃO**

O projeto iniciado é eficiente para a utilização e seleção ideal de parcelas para a construção de modelos de crescimento e produção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEZERRA, A. F. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. 2009. 60f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

BINOTI, M. L. M. S. **Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto**. 2010. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal**: Perguntas e respostas. 3rd ed. rev. e ampl.. Viçosa. Ed. UFV. 2009. 548p.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management**: a quantitative approach. New York: John Wiley e Sons, 1983, 333 p.

HEXSEL, R. A. Software Livre - Propostas de ações de governo para incentivar o uso de software livre. **Relatório técnico**. RT-DINF 004/2002. Curitiba, 2002.

HORSTMANN, C. S.; CORNELL, G. **Core Java**, Volume I – Fundamentos, 8ª edição, Pearson Prentice Hall, 2010, 383 p.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos**. Uma importante ferramenta da inteligência computacional. 2ª edição. Brasport. 2008. 400p.

## CONCLUSÕES GERAIS

Os projetos RPF, OtimToras, FitFD e Select são eficientes e flexíveis.

O projeto RPF pode ser utilizado para a construção de modelos de regulação da produção florestal com diferentes abordagens de modo eficiente.

O projeto OtimToras é eficiente para otimização de multiprodutos madeireiros considerando a demanda por diferentes produtos.

O projeto FitFD é eficiente e pode ser empregado para auxiliar na construção de modelos de distribuição de diâmetros.

O projeto Select é eficiente e pode ser utilizado para aumentar a eficiência na modelagem do crescimento e da produção.