

**Universidade de São Paulo**  
**Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”**

**Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de  
eucalipto**

**Thiago Libório Romanelli**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em  
Recursos Florestais., com opção em Silvicultura e Manejo  
Florestal**

**Piracicaba**

**2007**

**Thiago Libório Romanelli**  
**Engenheiro Agrônomo**

**Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto**

Orientador:

Prof. Dr. **MARCOS MILAN**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Recursos  
Florestais., com opção em Silvicultura e Manejo Florestal**

**Piracicaba**  
**2007**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Romanelli, Thiago Libório

Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto / Thiago Libório Romanelli. - - Piracicaba, 2007.  
121 p.; il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.  
Bibliografia.

1. Energia - análise 2. Energia de biomassa 3. Eucalipto 4. Meio ambiente - indicadores 5. Sistemas de produção 6. Termodinâmica  
I. Título

CDD 634.9734

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

À todo ser humano que desperta  
com o real intuito de tornar  
o mundo melhor,  
dedico.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES pelas bolsas concedidas, principalmente, a Bolsa de Doutorado no Exterior.

À Companhia Suzano Papel e Celulose por disponibilizar os dados e informações necessários.

Ao professor, orientador e amigo Marcos Milan, pelo exemplo, confiança, amizade e apoio constantes ao longo desses anos.

Aos professores do LCF, em especial, Fernando Seixas, Weber Amaral, Luiz Carlos Estraviz Rodriguez, José Luiz Stape e José Leonardo de Moraes Gonçalves.

Aos professores da EESC/USP Luiz Cesar Carpinetti e Edmundo Escrivão Filho.

À equipe do LCF, Catarina, Marcelo e Margarete, e do LER, Fernanda, Davilmar e Sra. Lurdes.

Às bibliotecárias Sílvia e Iara, pela atenção e apoio na formatação e na ficha catalográfica.

Aos colegas dos PPGs em Recursos Florestais e em Máquinas Agrícolas, em especial, Leandro Gimenez, José Vitor Salvi, Marcos Matos e Gustavo Faulin, Luiz Carlos Faria e Ana Schilling.

Aos amigos da ESALQ, de Piracicaba e de Gainesville, em especial Lucas Mari, Pedro e Adriana, Lincoln e Marta Zotarelli e Marcelo Heinig.

To Dr. Mark Brown, for the opportunity I had to work, learn and interact in the Center of Environmental Policy, University of Florida.

To Dr. Clyde Kiker for his example, humbleness and willingness to acquire and spread knowledge, thank you very much.

To Mario Giampietro, James Kay (*in memoriam*) and Ilya Prigogine whose studies will remain for me as a guide in the advance on energy studies.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUMO</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>11</b> |
| 1.1 Importância econômica do eucalipto no Brasil .....                         | 11        |
| 1.2 Sistemas de medição de desempenho.....                                     | 12        |
| 1.3 Análise energética.....  | 15        |
| 1.4 SMDs e a gestão ambiental .....  | 20        |
| <b>Referências</b> .....   | <b>21</b> |
| <b>2 DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE EUCALIPTO</b><br>..... | <b>24</b> |
| <b>Resumo</b> .....  | <b>24</b> |
| <b>Abstract</b> .....  | <b>25</b> |
| <b>2.1 Introdução</b> .....  | <b>26</b> |
| 2.1.1 Produtividade e demanda energética .....                                 | 27        |
| 2.1.2 Análises de energia.....   | 28        |
| <b>2.2 Desenvolvimento</b> .....   | <b>29</b> |
| 2.2.1 Fundamentos das metodologias.....  | 29        |
| 2.2.2 Algoritmo .....  | 32        |
| 2.2.3 Determinação da energia de saída .....                                   | 34        |
| 2.2.4 Determinação da energia de entrada.....                                  | 34        |
| 2.2.4.1 Consumo de combustível operacional.....                                | 35        |
| 2.2.4.2 Depreciação de maquinário .....  | 42        |
| 2.2.4.3 Mão-de-obra .....  | 43        |
| 2.2.4.4 Insumos agrícolas .....  | 43        |
| 2.2.5 Caracterização do sistema de produção.....                               | 44        |
| 2.2.6 Desenvolvimento do modelo, cenários e análise de sensibilidade .....     | 46        |
| 2.2.7 Resultados e Discussão.....  | 47        |
| <b>2.3 Conclusões</b> .....  | <b>61</b> |
| <b>Referências</b> .....   | <b>63</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>3 SÍNTESE DE EMERGIA EM FLORESTAS COMERCIAIS DE EUCALIPTO .....</b> | <b>66</b>  |
| <b>Resumo .....</b>  | <b>66</b>  |
| <b>Abstract .....</b>  | <b>67</b>  |
| <b>3.1 Introdução .....</b>  | <b>68</b>  |
| <b>3.2 Desenvolvimento .....</b>                                       | <b>74</b>  |
| 3.2.1 Material e Métodos .....   | 74         |
| 3.2.2 Resultados e Discussão.....                                      | 79         |
| <b>3.3 Conclusões .....</b>  | <b>99</b>  |
| <b>3.4 Conclusões Gerais.....</b>                                      | <b>100</b> |
| <b>Referências .....</b>   | <b>102</b> |
| <b>Anexos .....</b>  | <b>107</b> |

## RESUMO

### Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto

O setor florestal apresenta grande importância econômica no Brasil, representando uma significativa parcela no PIB, nas exportações e na geração de empregos. As florestas fornecem matéria prima para a produção de energia ou celulose e são avaliadas, normalmente, por um enfoque econômico, que, isoladamente, não traz a sustentabilidade do setor. Para se avaliar a sustentabilidade, análises sistêmicas e de fluxo de material são algumas das alternativas. O fluxo de material fornece subsídios às metodologias que abordam os diversos aspectos da sustentabilidade, como por exemplo, a análise de energia, a síntese de energia e análises integradas de aspectos sociais, econômicos e ambientais. Tendo em vista a importância da área florestal e a falta de estudos que permitam uma avaliação sistêmica dessa atividade, esse trabalho teve por objetivo avaliar a sustentabilidade energética de um sistema de produção. Para tanto, elaborou-se um modelo para determinar o fluxo de material, referente aos insumos utilizados indiretamente nas operações mecanizadas do sistema de produção: mão-de-obra, combustível e depreciação material do maquinário. Através desse modelo avaliou-se o cenário básico, que utiliza calcário na correção da acidez do solo e suas alternativas: cinzas e biossólido. Com base nesses resultados, avaliou-se o sistema através da análise de energia e da síntese de energia. A análise de energia aborda os fluxos energéticos dos insumos aplicados e o dos produtos obtidos, possibilitando a determinação da lucratividade energética (EROI), o ganho líquido (balanço de energia) e a intensidade energética do sistema de produção. A síntese de energia contempla os recursos naturais renováveis e os não-renováveis, além dos recursos adquiridos no mercado. Essa análise e síntese estabeleceram os fluxos de recursos, identificando seus principais fatores de produção e os indicadores que têm potencial de uso na tomada de decisão de empresas florestais. Utilizou-se da análise de sensibilidade para avaliar o efeito dos fatores de produção na sustentabilidade do sistema. Os resultados obtidos mostraram que o sistema de produção apresenta uma maior sustentabilidade energética quando comparado com os sistemas de produção menos intensificados. Para a análise de energia, o combustível foi o fator com maior participação na energia de entrada, com os fertilizantes e herbicidas na sequência. Na síntese de energia, um recurso renovável, evapotranspiração, foi o principal fator. Quando considerou-se os fatores exógenos ao sistema na síntese, o combustível, os fertilizantes e os corretivos de acidez foram os principais. Nas duas metodologias, a colheita foi a operação mais demandante de recursos e as alternativas ao calcário pioraram o desempenho energético do sistema. Ressalta-se que as avaliações dessas alternativas não consideraram os benefícios indiretos em não se descartar os resíduos utilizados no ambiente, indicando um caminho para novos estudos. Para se elevar a sustentabilidade, deve-se melhorar a eficiência da colheita e reduzir o uso de insumos com menor redução proporcional da produtividade. Ambas as metodologias deveriam ser consideradas na avaliação de sistemas produtivos, pois tratam de uso de recursos ambientais e exógenos e quantificam a intensidade energética dos produtos, permitindo comparações.

**Palavras-chave:** Sistemas de produção; Termodinâmica; Indicadores ambientais; Biomassa; Síntese de energia



## ABSTRACT

### **Energy sustainability of a production system of eucalyptus**

The forestry sector is very important to the Brazilian economy, representing a significant share of the GDP, exports and employment generation. Forests supply raw material for energy and cellulose production and are usually evaluated through an economical approach, which, alone, does not reflect the sustainability of the sector. In order to evaluate sustainability, system and material flow analyses are some alternatives. The material flow gives subsidy to methodologies that approach the several aspects of sustainability, such as, energy analysis, energy synthesis and analysis integrating social, economic and environmental aspects. Due to the importance of the forestry sector, the lack of studies that systemically evaluate this activity, this study aimed to evaluate the energetic sustainability of a production system. So, one elaborated a model to determine the material flow, regarding the inputs indirectly applied in the mechanized operations in the production system: labor, fuel and material depreciation of machinery. This model evaluated the basic scenario, which uses lime to control soil acidity, and its alternatives: ashes and sludge. Based on the obtained results, the system was evaluated through energy analysis and energy synthesis. The energy analysis approaches the energy flows of the applied inputs and the obtained products, propitiating the determination of the energetic profitability (EROI), the net gain (energy balance) and the energetic intensity of the production system. The energy synthesis ranges the renewable and non-renewable natural resources, besides those acquired in the market. This analysis and this synthesis establish the resource flows and identified the main production factors and present indicators with potential use in the decision making of forestry enterprises. The sensitivity analysis evaluated the effect of the production factors in the system's sustainability. The obtained results showed that the studied production system presents higher energetic sustainability than some systems with less intensification. In the energy analysis, fuel was the main factor in the energy input, followed by fertilizers and herbicides. In the energy synthesis, evapotranspiration, a renewable resource, was the main factor. Considering the factors exogenous to the system, fuel, fertilizers and soil acidity correctors were the main ones. In both methodologies, harvesting was the more demanding operation and the alternatives to liming decreased the energetic performance of the system. One should highlight that in the evaluating of both alternatives, no indirect benefit was considered, such as the avoidance of dumping those materials. This indicates new possibilities of studies. In order to increase sustainability, one should improve the harvest efficiency and reduce use of the agricultural inputs with less proportional reduction of the yield. Both methodologies should be considered in the evaluation of productive systems since they approach the use of environmental and exogenous resources; they quantify the intensity of products and allow comparisons among systems.

**Keywords:** Production systems; Thermodynamics; Environmental indicators; Biomass; Energy synthesis

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Algoritmo desenvolvido para analisar os fluxos de energia .....   | 33 |
| Figura 2.2 – Relação entre potência de motor e disponibilidade de potência na barra de tração em função de condição de tração e tipo de rodado. Adaptado de ASAE (2003b) ..... | 37 |
| Figura 2.3 – Mapa da região de Itatinga, São Paulo.....  | 44 |
| Figura 2.4 – Fluxograma das operações mecanizadas no sistema de produção avaliado .....  | 45 |
| Figura 2.5 – Comparação dos resultados de intensidade energética obtidos pelo modelo comparados com a bibliografia.....  | 48 |
| Figura 2.6 – Comparação dos resultados de energia de entrada obtidos pelo modelo comparados com a bibliografia.....  | 49 |
| Figura 2.7 – Participação dos insumos na energia de entrada, nos cenários: calcário (a), cinzas (b) e bio sólido (c) .....   | 56 |
| Figura 3.1 – Qualidade de energia em um processo de transformação energética (ODUM, 1996) .....  | 69 |
| Figura 3.2 – Relação entre energia e emergência ao longo de uma cadeia produtiva .....   | 71 |
| Figura 3.3 – Diagrama sistêmico agregando os fluxos de energia e os índices de emergência resultantes (adaptado de BROWN e ULGIATI 1997) .....                                 | 72 |
| Figura 3.4 – Fluxograma da determinação da síntese de emergência para o sistema de produção de eucalipto .....   | 77 |
| Figura 3.5 – Diagrama sistêmico para o sistema de produção de mudas de eucalipto.....  | 80 |
| Figura 3.6 – Demanda de emergência no sistema de produção de mudas .....   | 83 |
| Figura 3.7 – Diagrama sistêmico para o sistema de produção de eucalipto.....   | 85 |
| Figura 3.8 – Demanda de emergência nas alternativas calcário(a), cinzas (b) e bio sólido (c) para o controle de acidez do solo no sistema de produção de eucalipto.....        | 88 |
| Figura 3.9 – Disponibilização de energia em função de recursos (emergência) incorporados.....  | 97 |
| Figura 3.10 – Uso de recursos renováveis em função do tempo de rotação.....  | 98 |
| Figura 3.11 – Razão de investimento emergéutico em função do conteúdo emergéutico da biomassa .....  | 99 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1.1 – Impacto ambiental de várias formas de pressão. Adaptado de Gupta (1995) .....   | 13 |
| Tabela 1.2 – Propriedades da energia, exergia e emergia .....  | 16 |
| Tabela 2.1 – Características e coeficientes para os harvesters avaliados (Bramucci, 2001).....                                     | 42 |
| Tabela 2.2 – Fluxo de material na produção de eucalipto .....  | 50 |
| Tabela 2.3 – Análise de energia do sistema de produção avaliado .....  | 51 |
| Tabela 2.4 – Índices de eficiência energética do sistema de produção estudado .....  | 52 |
| Tabela 2.5 – Índices de eficiência energética considerando-se a energia solar.....   | 53 |
| Tabela 2.6 - Características dos materiais alternativos para a correção de acidez do solo .....                                    | 54 |
| Tabela 2.7 – Comparativo entre alternativas de correção de acidez do solo.....   | 54 |
| Tabela 2.8 – Demanda energética por operação e classe de insumo .....  | 57 |
| Tabela 2.9 – Demanda de energia dos componentes do sistema de produção .....   | 59 |
| Tabela 2.10 – Demanda energética das alternativas de manejo propostas nos cenários de correção da acidez do solo.....              | 60 |
| Tabela 3.1 – Síntese de emergia para mudas de eucalipto (ciclo de 90 dias).....  | 82 |
| Tabela 3.2 – Síntese de emergia para plantações de eucalipto (rotação de 7 anos) .....   | 86 |
| Tabela 3.3 – Porcentagem de emergia em insumos adquiridos (F) por operação e fator de produção .....                               | 89 |
| Tabela 3.4 – Características das alternativas de controle de acidez do solo .....  | 91 |
| Tabela 3.5 – Variação da demanda de emergia para as alternativas de manejo de acidez do solo (cenário calcário como base 100)..... | 92 |
| Tabela 3.6 – Síntese de emergia de diferentes sistemas de produção de biomassa (dados de biomassa colhida). .....                  | 95 |

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho se apresenta em três capítulos. O capítulo 1, introdução, fundamenta os conceitos do por que se deve avaliar a sustentabilidade de um sistema de produção de eucalipto não apenas por indicadores econômicos mas também por fluxos de material e de energia. O capítulo 2 foi desenvolvido para se estabelecer os fluxos e o desempenho das transformações energéticas enquanto que o capítulo 3 quantifica a demanda de recursos e analisa a sustentabilidade do sistema de produção de eucalipto, com base nos dados obtidos pelo modelo desenvolvido no capítulo anterior. Nos capítulos 2 e 3, analisou-se um sistema de produção e três alternativas no tocante aos insumos utilizados para controlar o pH do solo. Através da síntese de energia (com  $m$ ), avaliou-se o mesmo sistema não apenas em relação à contribuição dos insumos adquiridos, mas também os serviços<sup>1</sup> prestados pelo ambiente onde o sistema de produção está inserido (capítulo 3). Para os sistemas de produção agrícolas e florestais esses serviços geralmente são representados na síntese de energia pela evapotranspiração. A evapotranspiração é resultante da insolação e disponibilidade hídrica, oriunda de irrigação ou precipitação.

### 1.1 Importância econômica do eucalipto no Brasil

Segundo a FAO – Food and Agriculture Organization (2003), o Brasil apresenta aproximadamente 5,6 (3%) dos 187 milhões de hectares de florestas cultivados e 18% dos 500 bilhões de metros cúbicos da biomassa mundial. Sendo assim o setor florestal é um destaque nacional, participando com 4% do PIB (Produto Interno Bruto) e 8% das exportações (SBS – SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA, 2003). Para Garlipp (2001) o Brasil possui ainda 530 milhões de hectares de florestas nativas, pela qual sofre pressão internacional para a manutenção desses recursos. O setor florestal brasileiro, englobando papel e celulose, carvão vegetal, móveis e outros, gera aproximadamente US\$ 3 bilhões em impostos e emprega dois milhões de pessoas, direta e indiretamente. Isso se deve, em grande parte, aos 4,8 milhões de hectares de *Pinus* e *Eucalyptus spp.*, área essa que deve ser aumentada, devido à demanda por esses estoques e da ameaça da importação (GARLIPP, 2001).

---

<sup>1</sup> Serviços ambientais são entendidos como o efeito de fatores que influenciam a produção agroflorestal.

Entre outros usos, as plantações de eucaliptos no Brasil são as principais fontes de fibras para as indústrias de papel e celulose, que detêm uma capacidade de produção anual de 7,5 milhões de toneladas (BIAZ-BALTEIRO e RODRIGUEZ, 2006). O crescimento dessa atividade industrial torna a análise operacional da sustentabilidade do setor florestal necessária para se avaliar as alternativas viáveis à manutenção do suprimento de biomassa em uma escala global.

## 1.2 Sistemas de medição de desempenho

Diferentemente do cenário onde uma organização visava o oferecimento de seu produto ou serviço, muitas empresas, que antes ignoravam as conseqüências de suas atividades ao ambiente, passaram a considerar os impactos de seu sistema produtivo. Isto ocorreu em resposta à demanda e às expectativas dos diferentes consumidores (ESTY e CHERTOW, 1997; MORELLI, 1999). Esta mudança é enaltecida pelo significativo interesse em regras privadas de normalização, tais como as encontrados na ISO<sup>2</sup> 14000. Assim, as organizações de todos os tipos estão cientes em atingir e demonstrar um desempenho ambiental adequado através do controle dos impactos no ambiente de suas atividades, produtos e serviços (DYCKHOFF e ALLEN, 2001).

Uma vez que os *stakeholders*<sup>3</sup> das empresas vêm demandando cada vez mais que os produtos e insumos adquiridos sejam ambientalmente adequados, assuntos como proteção e consumismo ambiental começam a fazer parte da tomada de decisão na gestão de operações como um sistema estruturado. As possíveis formas de pressão e seus impactos podem ser observados na Tabela 1.1. Nessa tabela são listados como os diferentes consumidores (partes interessadas) de uma organização podem implementar a gestão ambiental na tomada de decisão, seja no processo produtivo (consumidor e fornecedor, mão-de-obra, comunidade local), nos âmbitos legal (governo) e financeiro (investidor e financeiro). Além disso, deve-se considerar a imagem que a organização apresenta perante a sociedade (credibilidade).

Desde os anos 60, defensores de empreendimentos e do ambiente travam batalhas sobre como fazer uso dos recursos naturais. Segundo Shireman (1999), a alternativa encontrada para essa abordagem “ganha-perde” foi considerar o negócio como um sistema. Assim, consegue-se não

---

<sup>2</sup> ISO é o acrônimo para *International Organization for Standardization*.

<sup>3</sup> O termo *stakeholders* se refere às partes interessadas de uma empresa: acionistas, consumidores, funcionários, fornecedores e a sociedade.

apenas melhorar o desempenho ambiental, mas implementar uma estratégia de melhoria do negócio como um todo. Os benefícios vão além das reduções dos impactos ambientais, aumentando a lucratividade das empresas.

Tabela 1.1 – Impacto ambiental de várias formas de pressão. Adaptado de Gupta (1995)

| <b>Formas de pressão</b> | <b>Impacto ambiental</b>   |
|--------------------------|--|
| Governo                  | Regulamentações ambientais severas e abrangentes                                       |
| Consumidor e fornecedor  | Melhor informado e mais consciente do conteúdo e impacto ambientais dos produtos       |
| Investidor               | Exame dos registros ambientais das companhias potenciais                               |
| Mão-de-obra              | Capacitação para desempenhar atividades reduzindo-se a poluição                        |
| Comunidade local         | Reclamações associadas a barulho, vibração, odor e outras perturbações                 |
| Financeiro               | Uso de levantamento de risco ambiental por bancos e companhias de seguro               |
| Credibilidade            | Resultados insatisfatórios de várias ações para se adequar ambientalmente das empresas |

Segundo Wall et al. (2001), os produtos agrofloretais podem apresentar atributos desejáveis, os quais poderiam ser associados com muitos fatores secundários à função principal do produto e/ou características do seu processo produtivo. A demanda poderia ser para culturas que não contivessem organismos geneticamente modificados ou livres de defensivos, ou cujo sistema de produção não interferisse tanto no ambiente. Assim, surge a preocupação para com a eficiência ambiental e econômica. DeSimone e Popoff (1997) conceituam eco-eficiência como sendo a entrega de produtos e serviços a preços competitivos, que satisfaçam as necessidades do ser humano e tragam qualidade de vida. Além disso, devem progressivamente reduzir os impactos ambientais por todo o ciclo, a um nível, no mínimo, da capacidade suporte estimada do planeta Terra. A eficiência ecológica é normalmente medida por indicadores de desempenho que tem como base os fluxos de energia e de material.

Em um escopo mais amplo, o termo ambiente se refere tanto à quantidade quanto à qualidade de recursos naturais, contemplando elementos como água, ar, paisagem e atmosfera. Para Panayotou (1992), ambiente é um determinante crítico da quantidade, qualidade e sustentabilidade de

atividades humanas e desenvolvimento industrial. Gupta (1995) afirma que a integração das diversas áreas funcionais de uma organização (legal, técnica, científica), abordada como um processo contínuo de melhoria de suas políticas e programas corporativos, é necessária para a melhoria da eficiência produtiva.

Shireman (1999) relata as histórias de empresários que adotaram uma visão sistêmica em seus negócios. Para um deles, Bill Coors (Cervejaria Coors), uma empresa é como um organismo vivo e todo desperdício representa lucro perdido e o ciclo deve se fechar trazendo informações sobre esse desperdício de volta à empresa. Tachi Kiuchi (outro empresário citado pelo autor), após visitar uma floresta tropical na Malásia, comparou-a analogamente com sua empresa (Mitsubishi Electric). Para ele, sua empresa deveria ser criativa, inovadora e resistente ao ambiente de negócios na qual estava inserida, evitando-se a perda de biodiversidade e da capacidade criativa tal como ele presenciou na floresta visitada.

Em seu trabalho, Gupta (1995) introduziu conceitos de gestão ambiental e abordou seu impacto na produção e nas operações. A gestão foi definida como um processo contínuo de tomar decisões operacionais, como: planejamento de produto; a capacidade e planejamento e ordenamento; processo de projeto; gestão de recursos humanos; de estoque; e da qualidade. Assim, vários insumos seriam transformados de forma eficiente numa linha de produtos e serviços.

Kaplan e Norton (1993) alertavam sobre a importância de se adotar sistemas de medição de desempenho (SMD) como uma ferramenta da estratégica, uma vez que as medidas financeiras tradicionais apresentam perspectiva de curto-prazo. O sistema denominado *Balanced Scorecard* (BSC) viria a complementar os indicadores financeiros tradicionais com medidas de desempenho a respeito de clientes, processos internos e melhoria das atividades. A ponderação das medidas revela tanto as trocas (*trade-off*) que os gestores fizeram entre as medidas de desempenho quanto os encoraja a atingir seus objetivos no futuro, sem ter que beneficiar individualmente um dos fatores chave de sucesso.

Para Gerólamo (2004) a partir da segunda metade do século XX, o foco principal dos problemas das empresas deixou de ser interno e referente à restrição da produção, passando para um escopo de restrição externa e competitividade. O foco passou a ser a satisfação dos diversos

*stakeholders*, diversificação e flexibilidade, uma vez que, produtividade, custo e lucro não mais compõem exclusivamente o foco principal.

Para Neely (1999) algumas das principais razões pelo crescente interesse em SMDs são as normas e prêmios nacionais e internacionais de qualidade, iniciativa de melhorias específicas e mudança das demandas externas. Isso pode ser traduzido, em termos ambientais, por certificações como a série ISO 14000 ou FSC (*Forest Stewardship Council*), bem como pela crescente busca pelo menor impacto ambiental ou identificação e implantação das melhores práticas.

Pelo fato da série ISO 14000 ser pouco testada, muitas das discussões têm de ser enunciadas em termos hipotéticos, especialmente porque no setor agroflorestal existe escassez de exemplos (WALL et al., 2001). Da mesma forma Dyckhoff e Allen (2001) afirmam que a bibliografia não contém métodos para sustentar comparações entre indicadores de desempenho operacional.

Por causa da iniciativa ambiental da ISO ser muito recente, pouco se conhece sobre a aplicabilidade e o potencial para a normalização voluntária, especialmente no setor da agroindústria. Além disso, há uma expectativa quanto a capacidade das iniciativas com fins lucrativos, através da ISO 14000, em atingir objetivos de caráter ambiental eficientemente (WALL et al., 2001).

O objetivo da ISO 14000 com relação aos impactos ambientais implica que a adequação não é apenas um item para empreendimentos individuais, mas também para os elaboradores de política pública. Mesmo se não for economicamente benéfico para as empresas que venham a ser certificadas, o envolvimento do governo em promover a ISO 14000 pode ser justificado pelos benefícios totais, incluindo melhorias ou prevenção dos impactos no ambiente. Estes impactos que são superiores ao custo, tendem a decrescer com a disponibilidade de sistemas de gerenciamento e proposições de política ambiental que possam ser adaptadas às propriedades, individualmente (WALL et al., 2001).

### **1.3 Análise energética**

No setor de planejamento agroflorestal, segundo Singh e Singh (1992), existem demandas conflitantes relativas à maximização da obtenção dos produtos desejáveis a partir de uma área agricultável limitada e a minimização de acréscimo de energia, na forma de insumos. Esses



fatores deveriam ser baseados no entendimento da interação entre a cultura e a energia contida nos diversos tratos culturais.

Ferraro Junior (1999) afirma que ainda há limites cada vez mais próximos para a intensificação do uso de energia no setor agroflorestal, devido à escassez de recursos energéticos, aos limites biofísicos do ambiente, à degradação dos espaços e da qualidade dos produtos agrícolas. Não existem mais razões técnicas ou econômicas para ampliar-se o uso de fertilizantes após um determinado ponto, pois a resposta a essa entrada inexistente ou é negativa. Segundo Stout e Myers (1979), políticas mais racionais relativas ao desenvolvimento de recursos energéticos adicionais e tecnologias para reduzir o consumo de energia pelos sistemas de produção deveriam ser implantadas para promover um grau maior de sustentabilidade.

Os sistemas ecológicos usam fluxos de energia e de massa para permanecer em um estado de auto-organização. A autêntica fonte de desenvolvimento dos ecossistemas é a energia solar, já que os nutrientes presentes no solo, a água e o oxigênio são gerados direta ou indiretamente a partir da captura e transformação dessa energia (ODUM, 1988). Por isso os ecossistemas podem ser considerados como cadeias de fluxos de energia e todos os produtos e serviços ecológicos como formas de energia solar transformadas ou armazenadas. Para quantificar e qualificar os sistemas de produção, metodologias como análise de energia, exergia e emergia podem ser empregadas. Elas podem ser aplicadas, pois abordam as leis da termodinâmica, o estado da matéria e os caminhos tomados pelo sistema de produção, e se complementam, pois apresentam propriedades distintas conforme Tabela 1.2 (BAKSHI, 2002).

Tabela 1.2 – Propriedades da energia, exergia e emergia

| Item | Energia   | Exergia  | Emergia                                      |
|------|---|--|--|
| 1    | Satisfaz a lei da conservação                   | Não satisfaz a lei da conservação                                      | Não satisfaz a lei da conservação            |
| 2    | Depende do estado da matéria em consideração    | Depende do estado da matéria em consideração e do estado de referência | Depende do estado da matéria em consideração |
| 3    | Independente dos passos levados ao estado atual | Independente dos passos levados ao estado atual                        | Depende dos passos levados ao estado atual   |

Não se pode contemplar as diversas análises energéticas sem citar a primeira e a segunda leis da termodinâmica. A primeira, também chamada de Lei da Conservação, estabelece que a energia

não pode ser criada, mas sim transformada, mantendo seu valor total ao longo dos processos, expressando que a energia é uma propriedade termodinâmica. Já a segunda, Lei da Entropia, estabelece que a cada transformação que uma forma de energia sofre, há uma perda devido a sua desordenação (entropia), estabelecendo que há aspectos quanti e qualitativos e que os processos reais ocorrem na direção da qualidade decrescente de energia (ÇENGEL e BOLES, 2001). Por exemplo, um cubo de gelo que derreta na superfície de uma mesa, libera calor, porém o calor liberado e o volume de água oriunda do gelo não são capazes de resfriá-lo novamente para a formação de um novo cubo (irreversibilidade dos processos).

Deve-se também conceituar energia, exergia e emergia. Energia pode ser considerada como a capacidade de provocar alterações. A conceituação de que é a capacidade de realizar trabalho não está de acordo com a segunda lei (Item 1 da Tabela 1.2), pois nem toda a energia potencial de uma fonte pode ser utilizada na realização de trabalho, pois a eficiência de 100% só existe no âmbito teórico, como no ciclo de Carnot. A exergia representa a energia disponível para a realização de trabalho e a emergia<sup>4</sup> é a energia incorporada de todos os processos e insumos necessários para a obtenção de um produto ou serviço. Essas últimas já consideram a segunda lei ao tratar da disponibilidade de energia (caso da exergia, expressa em joules) e índices de incorporação de recursos por unidade de exergia como no UEV (valor unitário de emergia ou transformidade) expresso em  $\text{sej J}^{-1}$ <sup>5</sup>. A emergia é expressa em uma forma de energia, geralmente a solar, como um denominador comum.

A unidade de energia no Sistema Internacional (SI) é o joule (J), cujo valor unitário é o produto de força (em newtons) pelo deslocamento (em metros), representando a capacidade da energia em realizar trabalho. Outra unidade é o Btu (*British Thermal Unit*), cujo valor unitário representa a elevação da temperatura de 1 libra (454g) de água que esteja a 68° F (20° C) em 1° F (1,8° C). O equivalente do Btu, utilizando-se das unidades do SI, é a caloria (elevar em 1° C, 1g de água a 15° C). Tanto Btus quanto calorias representam a capacidade de aquecimento. Embora haja uma correlação entre joules e calorias (4,186 J equivale a 1 cal), ambos representam propriedades distintas, pois todo trabalho pode ser transformado em calor, mas nem todo calor pode realizar

---

<sup>4</sup> Emergia denota memória da energia demandada para a obtenção de um produto ou serviço.

<sup>5</sup> sej é a unidade que mede emergia e representa joules de energia solar que por convenção 1 J de energia solar equivale a 1 sej.

trabalho. Assim surgiram análises como a exergia e emergia que consideram a segunda lei da termodinâmica.

Toda forma de energia pode ser convertida em calor com 100% de eficiência, mas embora seja uma boa medida da habilidade de aquecer água, não o é para avaliar processos mais complexos. Um joule de energia solar não equivale ao mesmo joule da gasolina, quando se pretende avaliar a capacidade de realizar trabalho (BROWN e ULGIATI, 2004).

Segundo Çengel e Boles (2001), a energia total é uma soma das energias interna (estrutura e grau de atividade molecular), cinética e potencial de um objeto e depende do estado em que a matéria se encontra para ser determinada (Item 2 da Tabela 1.2). Além de possuir tal dependência, a exergia é uma variável estado, uma vez que seu valor depende de uma referência. O estado de referência pode ser selecionado para ser o do sistema em equilíbrio ou em não-equilíbrio. Assim o valor da exergia independe do caminho tomado para a obtenção do produto (BAKSHI, 2002). A emergia, por se basear na energia disponível (exergia) utilizada na obtenção de produtos e serviços, também é determinada em função do estado da matéria.

Quanto aos passos tomados para se atingir o estado atual do sistema analisado (Item 3 da Tabela 1.2), a energia e a exergia analisam os produtos em si. Por exemplo, um metro cúbico de madeira da mesma espécie produzido sob mesmas práticas agrícolas, porém com diferentes níveis de erosão de solo, apresentarão o mesmo resultado para ambas as análises. A emergia, chamada de síntese e não de análise, por sua vez, contempla os processos necessários para a obtenção de um produto ou serviço (BAKSHI, 2002).

Para Brown e Ulgiati (2004), as análises de energia incorporada usam o equivalente de energia dos fluxos de entrada e saída do sistema. Nesse caso, superestima-se a energia de insumos diretamente aplicados e subestima-se a contida em bens e maquinário usados no sistema de produção. Assim, a energia que não é adquirida não é considerada. Por exemplo, o álcool etílico de milho pode parecer uma fonte considerável de energia, mas na síntese de emergia o resultado não é favorável, uma vez que ocorre a erosão de solo e a dependência em suprimentos de materiais e combustíveis. A síntese de emergia valora o quanto de material é despendido na obtenção de um produto ou serviço.

A análise de energia não apresenta um princípio de otimização nem quantifica o papel do ambiente em assimilar poluição. A síntese de emergia quantifica serviços ‘adquiríveis’ e ‘não

adquiríveis' em uma unidade comum de energia solar requerida para produzi-los e tem base na termodinâmica, teoria de sistemas e ecologia sistêmica. A síntese de emergia tem um princípio de otimização, *EmPower Principle*<sup>6</sup>, que afirma que o sistema que usa a emergia para reforçar o processo produtivo e superar limitações através da organização do sistema será bem sucedido (BROWN e HERENDEEN, 1996).

A síntese de emergia e a análise de energia diferem em escalas (temporal e espacial) e também a respeito da qualidade de energia. Em relação à escala temporal, a emergia considera a produção de cada matéria prima consumida para se obter os insumos usados no sistema de produção avaliado. Assim os indicadores de emergia têm uma memória de obtenção e consideram a depreciação de maquinário e o tempo levado para completar o processo de produção. A análise de energia mede o custo comercial de energia de um produto, a exergia mede a eficiência da qualidade termodinâmica no ponto de vista do usuário, mas ambas não abordam o serviço ambiental que suportam tanto o ecossistema quanto a sociedade (BROWN e ULGIATI, 2004).

Herendeen (2004) interpreta a síntese de emergia como uma visão mais ampla da ecologia. Ela dá suporte à humanidade e retrata a dependência direta e indireta do sol, porém o autor não a considera uma ferramenta prescritiva, nem uma diretriz.

A energia solar incorporada e o conteúdo de exergia fornecem informações sobre a sustentabilidade ambiental, mas falham na consideração de efeitos indiretos, como as emissões de poluentes. Exergia é a energia livre de entropia, habilidade em realizar trabalho e sob certas condições é igual à energia livre de Gibbs, à energia livre de Helmholtz ou ainda à entalpia. O conteúdo de exergia independe dos processos executados para a obtenção de um produto. A exergia pode identificar ineficiências e oportunidades em economizar energia, mas não indica qualidade, sendo 1 J de exergia elétrica equivalente a 1 J de exergia solar. A emergia contabiliza os insumos produzidos no passado e a exergia contabiliza a disponibilidade de trabalho no futuro, a emergia mede os insumos e serviços ambientais e a exergia mede o produto potencial (BAKSHI, 2002).

---

<sup>6</sup> *EmPower Principle* – traduzido literalmente como Princípio da EmPotência, que é a relação da emergia (sej) por tempo.

#### 1.4 SMDs e a gestão ambiental

Para monitorar os fluxos de energia pode-se aplicar o conceito de medição de desempenho, amplamente utilizado pelo setor industrial. Na medição de desempenho, segundo Bandeira (1997) e Kyan (2001), está inserida a idéia de melhoria, uma vez que as variáveis e atributos de interesse são quantificados para futuras análises e proposições de melhorias. Um medidor de desempenho de caráter ambiental deve conter algumas características presentes nos SMDs atuais, como ter medida não financeira e proporcionar o entendimento da relação causa-efeito. Kaydos (1991) destaca que a medição de desempenho identifica problemas e oportunidades, facilita o entendimento do processo e melhora o controle e o planejamento.

Carpinetti (2000) afirma que a utilização da SMDs não financeiros passou a ser valorizada como um importante instrumento para gerenciar e identificar os pontos críticos que comprometam o desempenho da organização e que devam ser alvos de melhorias. Os SMDs podem auxiliar na obtenção de parâmetros confiáveis para comparação entre empresas e entre seus setores, auxiliando no processo de implementação e gerenciamento das melhorias e mudanças.

Ao avaliar o uso de indicadores ambientais na Europa, Halberg et al. (2005) afirmam que indicadores relacionando *input* e *output* são fáceis de calcular, mas a interpretação do resultado demanda uma análise individual. Dessa forma, produtores e consultores necessitam de valores de referência confiáveis para avaliar o nível dos indicadores. Os autores ainda concluem que sistemas de contabilização *input-output* facilitam para que produtores e consultores melhorem o desempenho ambiental, reduzam o uso de defensivos (aspectos quanti e qualitativo). Esse tipo de análise funciona melhor quando vinculados às ferramentas de planejamento de produção. Citam ainda que são escassas as evidências de que a melhoria do desempenho e eficiência ambientais reflitam na redução de custos e que as relações de *input* e *output* devem incluir mais que um tópico (nutriente, energia, defensivos), existindo também a necessidade em se comparar resultados (*benchmark*).

Considerando-se que a floresta não é uma unidade única e exclusivamente econômica, mas também uma unidade termodinâmica e de transformação material, a crescente importância que os indicadores não-econômicos vêm ganhando na tomada de decisão das empresas florestais e a importância dessas empresas no cenário sócio-econômico nacional, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a sustentabilidade energética de um sistema de produção florestal.

## Referências

BAKSHI, B.R. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. **Computers & Chemical Engineering**, New York, v.26, p.269-282, Feb. 2002.

BANDEIRA, A.A. **Rede de indicadores de desempenho para gestão de uma hidrelétrica**. 1997. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

BROWN, M.T.; ULGIATI, S. Emergy analysis and environmental accounting. **Encyclopedia of Energy**, Amsterdam, v.2, p.329-354, 2004.

BROWN, M.T.; HERENDEEN, R.A. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. **Ecological Economics**, Amsterdam, v.19, p.219-235, 1996

CARPINETTI, L.C.R **Uma proposta para o processo de identificação e desdobramento de melhorias: um enfoque estratégico**. 2000. 170p. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. **Termodinâmica**. 3. ed. Lisboa: McGraw Hill, 2001. 1009p.

DeSIMONE, L.; POPOFF, F. **Eco-efficiency – The business link to sustainable development**. Cambridge: MIT Press, 1997. 292p.

DYCKHOFF, H.; ALLEN, K. Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**. Amsterdam, v. 132, n.2, p. 312-315, Jul. 2001

ESTY, D.C.; CHERTOW, M. Thinking ecologically: an introduction. In: CHERTOW, M.; ESTY, D.C.(Ed.) **Thinking ecologically: building the next generation de environmental policy**. New Haven: Yale University Press. New Haven, 1997. p. 1-14.

FAO – FOOD e AGRICULTURE ORGANIZATION. Disponível em <[www.fao.org](http://www.fao.org)>. Acesso em 14 out. 2003.

FERRARO JÚNIOR, L.A. **Proposição de método de avaliação de sistemas de produção e de sustentabilidade**. 1999. 132p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

GARLIPP, R.C. O setor florestal privado brasileiro e os desafios para o seu desenvolvimento. In: RODRIGUEZ, L.C.E (Ed.) **SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO DE GESTÃO E ECONOMIA FLORESTAL**, 2001. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 2001. p.45-67.

GERÓLAMO, M.C. Sistemas de medição de desempenho - revisão bibliográfica. Disponível em: <[http://www.prod.eesc.sc.usp.br/producao/pos\\_graduacao/disciplinas/sep5763/Plano\\_aula\\_SEP5763\\_2004.htm](http://www.prod.eesc.sc.usp.br/producao/pos_graduacao/disciplinas/sep5763/Plano_aula_SEP5763_2004.htm)>. 22 p. 2004. Acesso em 15 maio 2004.

- GUPTA, M.C. Environment management and its impact on the operations function. **International Journal of Operations & Production Management**, Cranfield, v.15, n.8, p.34-51, Aug. 1995
- HALBERG, N.; VERSCHUUR, G.; GOODLASS, G. Farm level environmental indicators: are they useful? An overview of green accounting systems for European farms. **Agriculture, Ecosystems and Environment, Amsterdam**, v. 105, n.1/2, p. 195-212, Jan 2005.
- HERENDEEN, R.A. Energy analysis and EMERGY analysis – a comparison. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.178, p.227-237, 2004.
- KAPLAN, R.S; NORTON, D.P. Putting the Balanced Scorecard to work. **Harvard Business Review**, New York, v.7, n.5, p.134-147, Sept/Oct. 1993.
- KAYDOS, W. **Measuring, managing and maximizing performance**. Portland: Productivity Press. 1991. 284p.
- KYAN, F.M. **Proposta para desenvolvimento de indicadores de desempenho para suporte estratégico**. 2001. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2001.
- MORELLI, J. **Voluntary environmental management: The inevitable future**. Boca Raton: CRC Press, 1999. 172p.
- NEELY, A. The performance measurement revolution: why now and what next? **International Journal of Operations and Production Management**, Cranfield, v.19, n.2, p.205-228, Feb. 1999.
- ODUM, H.T. Self organization, transformity, and information. **Science**, Washington, v.242, n.4882, p.1132-1139. Nov. 1988.
- PANAYOTOU, T. **Green markets: The economics of sustainable development**. San Francisco: Institute for Contemporary Studies Press, 1992. 169p.
- SHIREMAN, W.K. Business strategies for sustainable profits: systems thinking in practice. **Systems Research and Behavioral Science**, New York, v.16, n.5, p.453-462, May 1999.
- SINGH, S.; SINGH, G. Energy input vs crop yield relationship for four major crops of northern India. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Tokyo, v.23, n.2, p. 57-62, Feb. 1992.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. Disponível em: <[www.sbs.org.br](http://www.sbs.org.br)>. Acesso em 25 jun 2003.
- STOUT, B.A.; MYERS, C.A. Energy for worldwide agriculture. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Tokyo, v.10. n.3, p.11-18, Oct. 1979.

WALL, E.; WEERSINK, A.; SWANTON, C. Agriculture and ISO 14000. **Food policy**. Oxford, v. 26, n.1, p. 35-48, Feb. 2001.



## 2 DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE EUCALIPTO

### Resumo

Os sistemas florestais representam uma entidade econômica e termodinâmica, porém o aspecto energético ganhou notoriedade somente após os choques do petróleo na década de 1970. A intensificação desses sistemas se baseou no uso de energia fóssil, logo, esses choques elevaram a participação da energia nos custos. O objetivo de maximização da produtividade ficou antagônico ao de redução de custos. Assim, incorporou-se indicadores não econômicos à tomada de decisão do manejo. Para se avaliar e comparar os sistemas de produção, as análises de energia são vitais para se estabelecer os fluxos de demanda e disponibilização energética, além de como a demanda se divide dentre os diversos fatores de produção. Esses fluxos estabelecem o desempenho energético de um sistema. Tendo em vista a busca pela sustentabilidade dos sistemas de produção, a inserção de parâmetros não-econômicos na tomada de decisão e a magnitude do cultivo de eucalipto no Estado de São Paulo, o presente estudo teve por objetivo estabelecer os fluxos e o desempenho das transformações energéticas de um sistema de produção de eucalipto. Com base na análise de energia e em seus fundamentos elaborou-se um algoritmo. Após a caracterização do sistema, construiu-se um modelo para a determinação de fluxo de material, que baseia os fluxos de energia. Coletou-se os dados que, processados pelo modelo, caracterizaram o sistema. Avaliou-se as alternativas de material utilizado no controle de acidez do solo, calcário (cenário básico), cinzas e bio sólido. Através da análise de sensibilidade, verificou-se a influência dos fatores de produção na demanda total de energia. Embora não estabelecido pela metodologia empregada, determinou-se os indicadores de desempenho energético considerando-se também a energia solar. Os indicadores adotados foram o EROI, que indica a “lucratividade” energética, razão de energia disponibilizada e demandada; o balanço de energia, que indica o ganho absoluto e a intensidade energética, que atribui o conteúdo energético por unidade física do produto. No cenário básico obteve-se: EROI de 58,5 MJ MJ<sup>-1</sup> ou 8,4 MJ MJ<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, a intensidade energética da biomassa foi de 124,7 MJ m<sup>-3</sup>, e o balanço líquido de energia de 2120,7 GJ ha<sup>-1</sup> ou 303,0 GJ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. O sistema avaliado apresentou bom desempenho ambiental, comparando-se com outras referências. Considerando-se a energia solar, todos indicadores apresentaram valores negativos, concordando com a lei da entropia. A energia de entrada foi 5,2% e 57,2% maior para as alternativas cinzas e bio sólido, respectivamente. A intensidade energética apresentou a mesma tendência. O EROI calculado foi 95,0% e 63,1% do alcançado pelo cenário calcário para cinzas e bio sólido, respectivamente. O balanço sofreu decréscimo inferior a 1% para ambos. Os principais insumos demandantes de energia foram combustível, fertilizantes, herbicida e calcário. Nos cenários cinzas e bio sólido, os respectivos materiais se situaram em terceiro e primeiro lugares. A colheita é a operação mais demandante com 56,7%, seguida da subsolagem com 8,4%. O combustível na colheita, os fertilizantes e o calcário somam 79,6% da energia total. As cinzas e o bio sólido afetam mais a demanda de energia (até 57,4%) que os outros fatores de produção (máximo de 5,5%).

**Palavras-chave:** Fluxo de material; Análises de energia; EROI; Balanço de energia

## ENERGY PERFORMANCE OF A PRODUCTION SYSTEM OF EUCALYPTUS

### Abstract

Forestry systems are economic and thermodynamic entities, but the energy aspect was highlighted only after the oil shock in the 1970's. The intensification of these systems was based on fossil energy. So, the oil shocks increased the cost share of energy. An antagonism appeared between the goals to maximize yields and to minimize cost. Due to this, non-economic indicators were incorporated to the decision making in forest management. In order to evaluate and compare production systems, energy analyses are vital to establish the input and output energy flows and also how the energy input is divided among the production factors. Considering the search for sustainability of production systems, the insertion of non-economic parameters in the decision making and the magnitude of the cultivation of *Eucalyptus spp.* in Sao Paulo state, this study aimed to establish the energy flows and performance of a production system of eucalyptus. Based on energy analysis and its guidelines, an algorithm was elaborated. After the system characterization, a model was built to determine the material flow, in which the energy analysis is based. One collected data; they were processed by the model and characterized the system. The alternatives to control the soil acidity, lime (basic scenario), ashes and sludge were evaluated. Through the sensitivity analysis, the influence of production factors in the total energy demand was verified. Although not established by the methodology, the indicators of energy performance were determined considering the solar energy too. The adopted indicators were EROI, which relates the energy return over the invested energy; energy balance, which indicates the absolute energy gain; and the energy intensity, embodied energy per physical unit of the product. In the basic scenario, it was obtained the following results: EROI equals to  $58.5 \text{ MJ MJ}^{-1}$  or  $8.4 \text{ MJ MJ}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , the energy intensity was  $124.7 \text{ MJ m}^{-3}$  and the net energy balance was  $2120.7 \text{ GJ ha}^{-1}$  or  $303.0 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . The evaluated system presented a sound environmental performance, comparing to the results found in references. Considering the solar energy, all the indicators shower negative values, in agreement to the entropy law. The energy input was 5.2% and 57.2% larger for the alternatives ashes and sludge, respectively. Energy intensity presented similar tendency. The EROI was 95.0% and 63.1% of the determined for lime to ash and sludge, respectively. The energy balance decreased less than 1% in both alternatives. The main energy inputs were fuel, fertilizers, herbicide and lime. For the ash and sludge scenario, the respective materials were third and first in the energy demand order. Harvesting is the most demanding operation (56.7%) followed by subsoiling (8.4%). Fuel on harvesting, fertilizers and lime summed 79.6% of total energy. Ashes and sludge affected more the energy demand (up to 57.4%) than the other production factors (up to 5.5%).

**Keywords:** Material flow; Energy analyses; EROI; Energy balance

## 2.1 Introdução

No princípio da domesticação das culturas pela humanidade até a utilização de ferramentas no trabalho agrícola, o homem dispunha apenas dos instrumentos endossomáticos, o próprio corpo, para a realização das tarefas. Com o advento das ferramentas, a participação de instrumentos exossomáticos, não inerentes às características humanas, como enxadas, implementos e máquinas, foi crescendo continuamente. O uso desses instrumentos para a sobrevivência gerou problemas diferentes aos das outras espécies, sendo denominados de problemas bioeconômicos (GEORGESCU-ROEGEN, 1975).

O setor agroflorestal sofreu grandes avanços ao longo do século XX, partindo de um estado praticamente primitivo do uso da tração animal, até chegar aos patamares tecnológicos atuais, com a adoção de técnicas polêmicas como o emprego de materiais transgênicos. Esses avanços tiveram como suporte o aumento na demanda energética, principalmente das fontes de energia de baixa entropia, da qual o principal exemplo é o combustível fóssil, fazendo com que o cultivo deixasse, aos poucos, de ser a "arte de colher o sol" para se tornar um processo de transformação de petróleo, gás natural e eletricidade em energias utilizáveis pelo ser humano (FERRARO JÚNIOR, 1999). Políticas mais racionais deveriam ser implantadas para promover um grau maior de sustentabilidade. Essas políticas devem ser relativas ao desenvolvimento de recursos energéticos adicionais e tecnologias para reduzir o consumo de energia pelos sistemas de produção (STOUT e MYERS, 1979).

Os sistemas de produção vegetal necessitam de outras fontes de energia indiretamente aplicadas no cultivo, destacando-se os fertilizantes e os defensivos agrícolas, produtos geralmente derivados do petróleo (ALMEIDA, 1985). Segundo Serra et al. (1979), o excessivo aumento da energia investida é decorrência da utilização de insumos (fertilizantes, herbicidas, inseticidas, fungicidas), da mecanização e/ou da mão-de-obra requerida na sua aplicação. A energia gerada pelo setor agroflorestal, segundo Silva et al. (1987), é utilizada para satisfazer as necessidades calóricas da população na forma de alimentos, fontes de energia ou fibras (celulose) e prescinde de injeção energética nos processos de produção, transporte e transformação. As fontes de energia básicas podem ser agregadas em três grandes grupos: biológica, fóssil e elétrica. Segundo Taitner (1996) a forte dependência da sustentabilidade que os sistemas de produção atuais tem dos recursos naturais finitos gera problemas de ordem sócio-econômica e ambiental, que podem ser minimizados desde que haja mudança nos padrões de manejo das culturas.

### 2.1.1 Produtividade e demanda energética

A questão da produção agrícola há muito vem se constituindo num dos problemas cruciais da humanidade, diante do quadro atual de escassez de recursos. O alerta geral sobre a eventual falta de combustíveis fósseis foi transmitido pelos países árabes e persas em outubro de 1973, na denominada “primeira crise do petróleo”, conforme mostra Rodrigues (1975).

Ferraro Junior (1999) afirma que há limites cada vez mais próximos para a intensificação do uso de energia no setor agroflorestal, devido à escassez de recursos energéticos, aos limites biofísicos do ambiente, à degradação dos espaços e da qualidade dos produtos agrícolas. Não existem mais razões técnicas ou econômicas para ampliar-se o uso de fertilizantes após um determinado ponto, pois a resposta a essa entrada inexistente ou é negativa. Também não há possibilidade de se intensificar o uso da mecanização agrícola uma vez que isto só implicaria em perdas físicas e biológicas do solo.

Segundo Ulbanere (1988), enquanto desenvolvem-se tecnologias que visam o aumento da produtividade agroflorestal, inúmeros fatores concorrem para dificultar a obtenção de um nível satisfatório de sustentabilidade, podendo-se destacar a influência direta e indireta dos combustíveis fósseis na formação do custo. De acordo com Ulbanere e Ferreira (1989) as economias dos países passaram a ter maior preocupação com seus gastos energéticos, pois até então os derivados fósseis, que apresentavam um ônus irrelevante, passaram a ter participação significativa na maior parte das operações agrícolas.

No setor de planejamento agroflorestal há demandas conflitantes relativas à maximização da obtenção dos produtos desejáveis, a partir de uma área agricultável limitada, e a minimização de acréscimo de energia, na forma de insumos. Esse conflito deve ser amenizado através do entendimento da interação entre a cultura e a energia contida nos diversos tratamentos culturais realizados (SINGH e SINGH, 1992). Um sistema produtivo que tenha como produto a disponibilização de energia, deveria considerar o ótimo energético, diferentemente das tomadas de decisão que se balizam pela busca do ótimo econômico. Para a cultura do milho, Serra et al. (1979) mostrou que o melhor retorno sobre a energia aplicada via fertilizante se dava a 60% da produtividade máxima obtida.

### 2.1.2 Análises de energia

O conhecimento de como os sistemas de produção gastam e produzem energia é fundamental para a definição de políticas de estímulo à produção, ou de restrição do consumo, em função da importância estratégica que os sistemas ocupam como potencial produtores de excedente energético para outros setores da economia (CASTANHO FILHO E CHABARIBERI, 1983). O balanço energético, segundo Silva et al. (1976), é um fator de fundamental importância para a eleição de uma matéria-prima para a produção de energia. Molina Junior (1991) considera que existe a necessidade em se melhorar a eficiência no consumo energético para minimizar o impacto ao meio ambiente, pois, em grande parte, o uso de combustíveis fósseis causa a emissão de gases poluentes à atmosfera.

O balanço energético visa estabelecer os fluxos de energia, identificando a demanda total, a eficiência refletida pelo ganho líquido e pela relação produção/demanda, além da quantidade necessária para produzir ou processar um determinado produto. O balanço é um fator de fundamental importância para a eleição de uma matéria-prima para a produção de energia e, nesse processo, identificam-se e quantificam-se todos os insumos utilizados e produzidos (SIQUEIRA et al. 1999; HETZ et al., 1994).

No balanço energético considera-se como energia de entrada não somente as fontes de energia empregadas, como por exemplo, a eletricidade e os combustíveis, mas também a energia demandada nos processos de fabricação e obtenção de outros insumos e serviços utilizados no processo produtivo. No caso de um sistema agrícola, além do óleo diesel utilizado nas operações mecanizadas e da eletricidade utilizada por sistemas de irrigação ou secadores em unidades de armazenamento, contabiliza-se também a energia incorporada em insumos como maquinário, fertilizantes, defensivos, sementes e demais insumos empregados no processo de produção, sendo adicionais à solar (SOUSA e MILANEZ, 1990). Fluck e Baird (1982) afirmam que a análise energética é a análise objetiva das quantidades físicas envolvidas em um processo ou sistema, podendo identificar e medir os fluxos de energia.

Os sistemas de produção agrícolas e florestais adotam e continuarão a demandar avanços tecnológicos para abastecer, com as mais diversas alternativas de biomassa, uma população mundial em constante crescimento com recursos naturais limitados. Nesse panorama é vital

analisar os cenários e as alternativas de manejo existentes, não somente pelo aspecto econômico, mas também social e ambiental.

Considerando a produção de biomassa e demanda energética, Angelini et. al (2005) avaliaram a relação de *input/output* de cana-do-reino (*Arundo donax* L.) com diferentes densidades de plantio e adubações. A adubação aumentou a produtividade em 15%, porém a demanda energética aumentou em 350% (de 4 para 18 GJ ha<sup>-1</sup>). O maior ganho energético líquido (*output* – *input*) foi obtido pelo plantio mais denso com adubação, porém o maior balanço energético (*output* / *input*) ocorreu com o plantio menos denso sem adubação. A energia demandada pela mão-de-obra não foi considerada nesse estudo.

Estudando a agricultura na Turquia, Ozkan et al. (2004) identificaram que: a energia de entrada aumentou em 2,5 vezes de 1975 a 2000; a relação *output/input* decresceu de 2,23 para 1,18; o trabalho humano e animal decresceu de 60,4% para 14,6%; os trabalhos, mecânico e elétrico, cresceram de 39,6% para 85,5%. Os principais insumos, no tocante à demanda de energia aplicada à atividade, foram o óleo diesel (54,2%) e a eletricidade (30,8%).

Tendo em vista a busca pela sustentabilidade dos sistemas de produção, a inserção de parâmetros não-econômicos na tomada de decisão e a magnitude do cultivo de eucalipto (*Eucalyptus spp.*) no Estado de São Paulo, o presente estudo teve por objetivo estabelecer os fluxos e o desempenho das transformações energéticas de um sistema de produção de eucalipto.

## **2.2 Desenvolvimento**

O presente trabalho foi desenvolvido de acordo com as seguintes etapas: seleção da metodologia adotada com base em seus fundamentos; a proposição de um algoritmo; caracterização do sistema de produção; a elaboração e a verificação do modelo em planilha eletrônica baseado no algoritmo; coleta de dados; validação dos resultados gerados pelo modelo; proposição de cenários e análise de sensibilidade.

### **2.2.1 Fundamentos das metodologias**

Tendo em vista o nível de intensificação alcançado pelos sistemas de produção agrícolas e florestais, a crescente preocupação mundial para com o fim das fontes de energia fóssil, a

necessidade em se caracterizar como e onde a energia é demandada pelas práticas agrícolas e florestais, escolheu-se a análise de fluxos de energia para ser realizada no presente trabalho. Escolheu-se essa metodologia, pois, através dela, pode-se estabelecer os fluxos de energia, identificar a demanda total, determinar a eficiência energética que é refletida pelo ganho líquido de energia e também pela relação entre a energia disponibilizada e a demandada. Essa metodologia tem sido aplicada como uma forma de avaliar o nível de desenvolvimento da agricultura desde os anos de 1970 por pesquisadores como, David Pimentel, Charles Hall, Cutler Cleveland entre outros, que analisaram os fluxos de energia e avaliaram o grau de sustentabilidade de diversas culturas. O uso dessa metodologia permite a aplicação de alguns indicadores que abordam o desempenho energético de sistemas de cultivo, sendo os principais: EROI (acrônimo para *Energy Return Over Investment*), balanço de energia (BE) e intensidade energética (IE). O EROI refere-se a razão da energia disponibilizada/demandada em um processo, podendo ser entendido como a “lucratividade energética”. O BE refere-se ao ganho líquido de energia por área cultivada e a IE é a intensidade de energia por unidade de produto (massa, volume) obtido, sendo vital para avaliar processos cujos produtos não apresentam finalidade de disponibilização de energia. Esses indicadores são determinados a partir dos fluxos de energia de entrada (EE) e de saída (ES) do sistema.

Alguns autores se referem ao balanço de energia como a razão de energia disponibilizada e a demandada por um sistema de produção (SILVA et al., 1976; SIQUEIRA et al., 1999; HETZ et al., 1994). Porém nesse trabalho adotou-se para essa razão a denominação EROI (*energy return over investment*) (HALL, 2004), sendo considerado balanço de energia o ganho absoluto líquido de energia por área cultivada (*output – input*). O EROI é calculado segundo a Equação 2.1, que determina o ganho de energia líquido, indicando a agregação de energia que o sistema estudado obtém durante seu ciclo produtivo.

$$\text{EROI} = \frac{(\text{ES} - \text{EE})}{\text{EE}} \quad (2.1)$$

Em que:

EROI = retorno em energia sobre energia investida, em MJ MJ<sup>-1</sup> <sup>7</sup>;

EE = energia de entrada, em MJ ha<sup>-1</sup>;

ES = energia de saída, em MJ ha<sup>-1</sup>.

Para se estabelecer o balanço de energia (BE), Equação 2.2, subtrai-se da energia de saída (ES) a energia de entrada (EE) na obtenção do produto. Assim determina-se o ganho líquido por área cultivada.

$$BE = ES - EE \quad (2.2)$$

Em que:

BE = balanço de energia, em MJ ha<sup>-1</sup>.

Caso a destinação da biomassa não seja a disponibilização de energia, como por exemplo, na produção de celulose, pode-se considerar a biomassa produzida como o *output*. Assim, tem-se um índice que relaciona a biomassa produzida com a energia demandada pelo sistema de produção. Esse índice é a intensidade energética (IE), energia por massa ou volume. Para o seu cálculo, determina-se o quanto de energia por unidade de produto final foi requerida através da razão da energia de entrada (MJ ha<sup>-1</sup>) e a produtividade obtida (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) (Equação 2.3).

$$IE = \frac{EE}{Prod} \quad (2.3)$$

Em que:

IE = intensidade, energética, em MJ m<sup>-3</sup>;

Prod = produtividade, em m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

---

<sup>7</sup> Considerou-se MJ MJ<sup>-1</sup> a unidade do EROI. Essa consideração foi realizada porque alguns autores reconhecem diferentes qualidades de energia em função de sua origem, embora a primeira vista o indicador seja adimensional.



### 2.2.2 Algoritmo

Para se estabelecer os fluxos de energia em um sistema de produção de eucalipto desenvolveu-se o algoritmo apresentado na Figura 2.1. O algoritmo se inicia (1)<sup>8</sup> com a entrada de dados sobre a floresta plantada (2), a mão de obra empregada (3) e as operações mecanizadas realizadas no manejo florestal (4). As operações mecanizadas englobam dados sobre os implementos (5) e a frota<sup>9</sup> (6) utilizados, além dos insumos recomendados (8). As determinações que fazem uso dos dados da frota se diferenciam, entre tratores e outras máquinas como colhedoras e pulverizadores autopropelidos, apenas pelo fato dos dados referentes aos implementos dependerem da própria automotriz e não do implemento, no caso de tratores. A condição de solo (7) embora não esteja relacionada diretamente com as operações mecanizadas, afeta a exigência de tração do conjunto trator-implemento.

Os dados necessários sobre a floresta (9) são: volume individual das árvores, altura média das árvores e presença de descascamento. Esses dados determinam a capacidade de processamento em  $m^3 h^{-1}$  (19). Através da relação entre a capacidade de processamento e a produtividade (10) em  $m^3 ha^{-1}$ , obtém-se a capacidade de campo operacional da colheita mecanizada (20), em  $ha h^{-1}$ .

Os dados básicos referentes aos implementos (12) são: massa, vida útil, largura, velocidade, eficiência de trabalho e profundidade. Com a massa e a vida útil determina-se a depreciação física do maquinário (25), que representa o custo energético de reposição dos mesmos. Com a largura, a velocidade e a eficiência de trabalho determina-se a capacidade de campo operacional – CcO (21). A profundidade, por sua vez, afeta a exigência de potência (17), que também depende das condições de trafegabilidade do solo (14). Os dados de massa e vida útil da frota (13) também compõem a depreciação de maquinário (25) juntamente com a CcO (21). A potência listada na frota (6) permite a determinação da potência disponível (16). A razão (18) entre a potência demandada (17) e a disponível (16) fornece as bases para a determinação do consumo específico (22) a diferentes cargas. O consumo específico, associado à potência

---

<sup>8</sup> Os números entre parênteses indicam as etapas do algoritmo mostrado na Figura 2.1.

<sup>9</sup> Classificou-se como frota todas as máquinas autopropelidas, tais como tratores, colhedoras, pulverizadores autopropelidos entre outros.

demandada (17), permite o cálculo do consumo horário ( $L h^{-1}$ ), o qual relacionado à CcO, fornece o consumo operacional ( $L ha^{-1}$ ) (26).

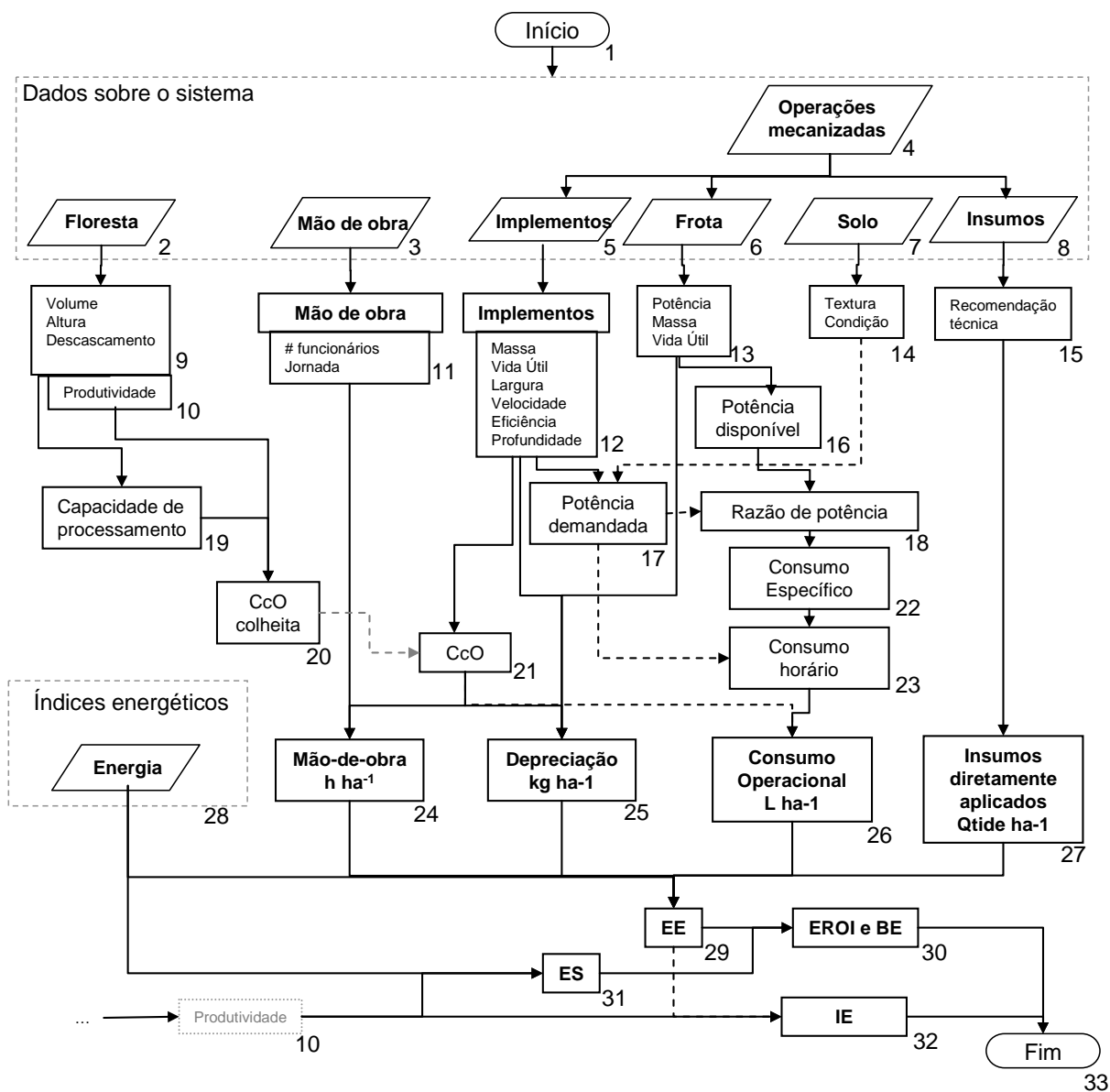


Figura 2.1 – Algoritmo desenvolvido para analisar os fluxos de energia

Os dados da mão-de-obra, número de funcionários e duração da jornada de trabalho (11), juntamente com a CcO das operações mecanizadas (21) determinam a demanda de horas-homem por área (24).

Uma vez que a taxa de aplicação de insumos é fornecida através de recomendações técnicas (15), a quantidade (volume, massa, unidade) por área é fornecida diretamente (27).

Multiplicando-se cada um dos insumos utilizados, mão-de-obra (24), depreciação (25), combustível (26) e insumos (27) pelos seus respectivos índices energéticos (28) obteve-se a contribuição de cada um deles à entrada de energia no sistema produtivo. A soma desses produtos resulta na energia de entrada – EE (29). Os dados referentes aos índices energéticos têm como fonte a bibliografia. O produto do índice de energia (28) contida na madeira produzida e da produtividade (10) fornece a energia de saída – ES (31). Relacionando-se os fluxos de energia de entrada (29) e saída (31) calcula-se os índices EROI e balanço de energia – BE (30). A relação da energia de entrada (29) com a produtividade (10) indica a intensidade energética – IE (32) do volume de madeira produzido. Com o cálculo desses indicadores o algoritmo é finalizado (33).

### 2.2.3 Determinação da energia de saída

A determinação da energia de saída (ES) foi calculada como a função da produtividade e do conteúdo energético da biomassa produzida (Equação 2.4).

$$ES = \text{Prod} * \text{Ind} \quad (2.4)$$

Em que:

ES = energia de saída ( $\text{MJ ha}^{-1}$ );

Prod = produtividade da floresta ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ );

Ind = conteúdo energético da floresta ( $\text{MJ m}^3$ ).

### 2.2.4 Determinação da energia de entrada

Com base nos fluxos de mão-obra, depreciação de maquinário, consumo operacional, nos insumos aplicados na implantação e condução da floresta e nos respectivos índices de energia de cada um desses fatores, determinou-se os fluxos de energia de entrada (EE) do sistema de produção avaliado (Equação 2.5).

$$EE = \sum_i^I \text{Insumo}_i * \text{Ind}_i \quad (2.5)$$

Em que:

EE = energia de entrada (MJ ha<sup>-1</sup>);

Insumo<sub>i</sub> = quantidade por hectare do i-ésimo insumo utilizado na implantação e manejo da floresta (kg ha<sup>-1</sup>, L ha<sup>-1</sup>, unidades ha<sup>-1</sup>);

Ind<sub>i</sub> = conteúdo energético do i-ésimo insumo (MJ kg<sup>-1</sup>, MJ L<sup>-1</sup>, MJ unidade<sup>-1</sup>). Os valores dos índices de conteúdo energético dos insumos utilizados estão apresentados nos Anexos A, B, C e D.

A equação 2.5 representa a soma dos fluxos de energia contida na mão-de-obra, depreciação de maquinário, consumo operacional de combustível e dos insumos diretamente aplicados. Cada um desses fluxos de energia se baseia no fluxo de material que lhe diz respeito. Por exemplo, o fluxo de energia na mão-de-obra depende da quantidade de trabalho humano empregado por área (número 24 da Figura 2.1). O fluxo de energia da depreciação de maquinário depende da massa despendida por área (25), o do consumo operacional de combustível depende do volume necessário por área (26) e o de insumos utilizados depende da recomendação técnica (27).

Em função da importância de cada um dos quatro fluxos de material (mão-de-obra, depreciação, consumo operacional e insumos), definiu-se as equações utilizadas na elaboração do modelo desenvolvido no presente trabalho.

#### 2.2.4.1 Consumo de combustível operacional

Através dos valores de consumo horário de combustível e da CcO determinada, determina-se o consumo de combustível operacional (Equação 2.6).

$$C_{OP} = \frac{C_{Hora}}{CcO} \quad (2.6)$$

Em que:

$C_{OP}$  = consumo operacional ( $L ha^{-1}$ );

$C_{Hora}$  = consumo horário ( $L h^{-1}$ );

$CcO$  = capacidade de campo operacional ( $ha h^{-1}$ ).

### Consumo horário

Para a determinação do consumo horário, o algoritmo se inicia nos dados de entrada das operações mecanizadas que se referem aos implementos e da frota autopropelida. Os dados necessários sobre a frota (6) são a potência, a massa e a vida útil (13). A potência de um trator, colhedora ou outra máquina autopropelida determina a oferta de potência do conjunto motomecanizado (número 16 - Figura 2.1).

A potência disponível na tomada de potência (TDP) do trator (16) tem relação direta com a potência do motor do trator (Figura 2.2), sendo assim determinada pela multiplicação pelo fator fixado (Equação 2.7).

$$PD_{TDP} = PB_{MOTOR} * 0,83 \quad (2.7)$$

Em que:

$PD_{TDP}$  = Potência disponível na TDP (kW);

$PB_{MOTOR}$  = Potência bruta do motor (kW).

Os dados sobre implementos (5), largura, profundidade de trabalho (12) e a textura do solo (14) influenciam nas determinações da potência requerida pelo implemento (17) para que a operação mecanizada seja realizada. O dado de velocidade se refere ao conjunto trator-implemento, uma vez que a oferta e demanda de potência é que determinará a possibilidade de execução da operação motomecanizada.

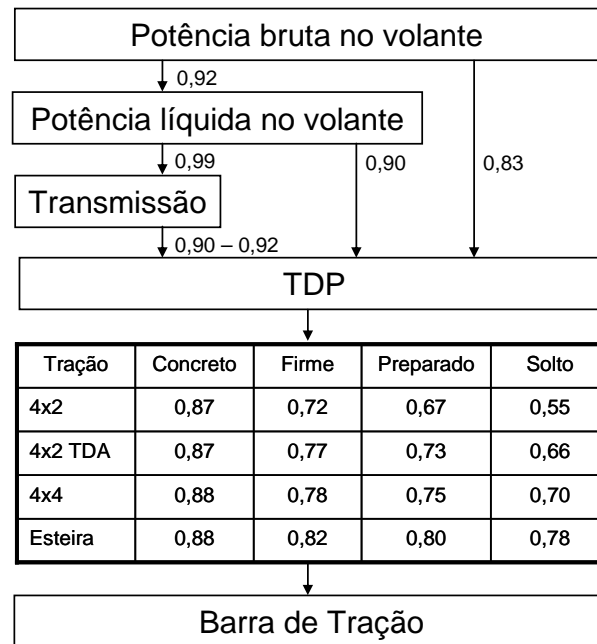


Figura 2.2 – Relação entre potência de motor e disponibilidade de potência na barra de tração em função de condição de tração e tipo de rodado. Adaptado de ASAE (2003b)

A força necessária para se utilizar um dado implemento é determinada através do modelo adotado na norma D497.4 (ASAE, 2003b) da ASAE<sup>10</sup>. No modelo adotado, o consumo específico (22), volume por potência e tempo, de combustível se dá pela razão (18) entre potência demandada pelo implemento e a potência disponível na TDP do trator. A determinação da potência requerida tem origem na determinação da força exercida pelo implemento (Equação 2.8).

$$D = F_i [A + B(V) + C(V)^2] L T \quad (2.8)$$

Em que:

D = força (N) requerida pelo implemento;

F = fator adimensional para ajuste do parâmetro textura do solo;

i = 1 para textura fina, 2 para média e 3 para grossa;

<sup>10</sup> ASAE – American Society of Agricultural Engineers.

A, B e C = parâmetros específicos do implemento;

V = velocidade de operação ( $\text{km h}^{-1}$ );

L = largura do implemento (m) ou número de hastes;

T = profundidade para equipamentos de preparo de solo (cm) ou 1 adimensional para equipamentos que não operem em profundidade.

Considerando o deslocamento realizado pelo conjunto motomecanizado, a força exercida e o fator de transmissão de potência pelo rodado, obtém-se a potência requerida na TDP (17) (Equação 2.9). Este fator de transmissão de potência pelo rodado se dá em função do tipo de rodado do trator e da condição de tração do terreno (Figura 2.2).

$$PR_{TDP} = \frac{\left(\frac{D}{1000}\right)}{CTr} \left(\frac{V}{3.6}\right) \quad (2.9)$$

Em que:

$PR_{TDP}$  = Potência requerida pelo implemento na TDP (kW);

D = força requerida pelo implemento (N);

CTr = fator de transmissão de potência pelo rodado (decimal);

V = velocidade de operação ( $\text{km h}^{-1}$ ).

A relação entre a potência requerida pelo implemento e a disponibilizada pelo trator na TDP, aqui chamada de razão de uso de potência disponível na TDP, se dá conforme a Equação 2.10.

$$RUP_{TDP} = \frac{PR_{TDP}}{PD_{TDP}} \quad (2.10)$$

Em que:

$RUP_{TDP}$  = razão de uso de potência disponível na TDP (decimal);

$PR_{TDP}$  = Potência requerida pelo implemento na TDP (kW);

$PD_{TDP}$  = Potência disponível na TDP (kW).

Aplicando-se a  $TUP_{TDP}$  no modelo proposto por Milan (1992), que analisou os dados de ensaios de trator produzidos pela indústria brasileira efetuados pelo Centro Nacional de Engenharia Agrícola (CENEA), determinou-se o consumo específico (22) dos tratores (Equação 2.11).

$$CE = 0,288 + \frac{0,0847}{RUP_{TDP}} \quad (2.11)$$

Em que:

CE = Consumo específico ( $L \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), referente à potência exigida na TDP do trator;

$RUP_{TDP}$  = razão de uso de potência disponível na TDP (decimal).

Com o consumo específico (22) e a potência requerida (17) pelo implemento determina-se o consumo horário (23) (Equação 2.12).

$$C_{\text{Hora}} = CE * PR_{TDP} \quad (2.12)$$

Em que:

$C_{\text{Hora}}$  = consumo horário ( $L \text{ h}^{-1}$ );

CE = Consumo específico ( $L \cdot \text{kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ );

$PR_{TDP}$  = Potência requerida na TDP (kW).

### Capacidade de campo operacional

A forma pela qual a capacidade operacional determinada depende do tipo de operação. Se houver processamento do material como na colheita, a produtividade da cultura colhida



influencia o valor, pois a produtividade se relaciona à área. Nas demais operações, a determinação da capacidade de campo operacional (CcO) se dá com base em características do implemento (largura) e de sua relação com a máquina motriz (velocidade e eficiência) na execução da operação.

### Operações exceto colheita

A capacidade de campo operacional (CcO) é um fator chave para que a demanda de material e serviço determinados com base em tempo como consumo de combustível, mão-de-obra e depreciação de maquinário sejam indexados por área.

Caso a máquina autopropelida não seja uma colhedora automotriz, a capacidade de campo operacional é determinada através da velocidade, largura e eficiência de operação (12) (Equação 2.13), dados referentes ao implemento (5) utilizado e na execução da operação mecanizada. A largura do implemento é fornecida através do cadastro do implemento, enquanto que a velocidade e eficiência de operação são listadas na norma D497.4 (ASAE, 2003b), com valores para níveis distintos (mínima, típica e máxima).

$$CcO = \frac{V * L}{10} * Efc \quad (2.13)$$

Em que:

CcO = Capacidade de campo operacional (ha h<sup>-1</sup>);

V = velocidade de operação (km h<sup>-1</sup>);

L = largura do implemento (m);

Efc = eficiência de campo (decimal).

### Colheita

Os dados sobre a floresta (2) como volume individual e altura média das árvores e execução de descascamento no campo (9) afetam a capacidade de processamento (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>) das colhedoras

florestais. Adotou-se para o sistema de colheita de tora curta o modelo desenvolvido por Bramucci (2001), que reuniu dados de colhedoras “harvesters” em 9 grupos e gerou duas equações para capacidade de processamento em função de características da floresta, considerando a colheita sem descascamento (Equação 2.14) e com descascamento (Equação 2.15).

$$CP_{Hsd} = e^{[2,04738 + EQ + (2,2371 * Varv) + (0,0127*ALT)+(0,00026*Vha)]} \quad (2.14)$$

$$CP_{Hcd} = e^{[1,96203 + EQ + (1,9532 * Varv) + (0,00294*ALT)+(0,00024*Vha)]} \quad (2.15)$$

Em que:

$CP_H$  = capacidade de processamento do harvester ( $m^3h^{-1}$ );

sd = sem descascamento;

cd = com descascamento;

EQ = coeficiente para o tipo de equipamento utilizado, conforme Tabela 2.1;

Varv = volume médio de cada árvore ( $m^3$ );

ALT = altura média das árvores (m);

Vha = volume de madeira por hectare ( $m^3$ ).

Com base na capacidade de processamento do *harvester* e da produtividade da floresta é possível se determinar a capacidade de campo operacional da operação (Equação 2.16).

$$CcO = \frac{CP_H}{Prod} \quad (2.16)$$

Em que:

CcO = capacidade de campo operacional ( $ha h^{-1}$ );

$CP_H$  = capacidade de processamento do harvester ( $m^3h^{-1}$ );

Prod = produtividade da floresta ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ).

Tabela 2.1 – Características e coeficientes para os harvesters avaliados (Bramucci, 2001)

| Grupo | Harvester       | Rodado | Cabeçote       | Potência<br>kW | Massa<br>t | EQsd     | EQcd    |
|-------|-----------------|--------|----------------|----------------|------------|----------|---------|
| 1     | Sisu-Valmet 601 | 4x4    | Valmet 960     | 95             | 14,7       | 0        | n.a.    |
| 2     | Bell            | est.   | FX 450         | 73             | 15,0       | n.a.     | n.a.    |
| 3     | TJ 608          | est    | Rinsley sling. | 125            | 21,9       | 0.08399  | n.a.    |
| 4     | Caterpillar 320 | est    | Rinsley sling. | 95             | 23,0       | 0.08829  | n.a.    |
| 5     | Sisu-Valmet 601 | 6x6    | Valmet 960     | 128            | 18,1       | 0.06746  | n.a.    |
| 6     | Caterpillar 320 | est    | Valmet 960     | 95             | 20,6       | 0.25819  | 0.44478 |
| 7     | Fiat FH 200     | est    | Valmet 965     | 105            | 22,3       | 0.18931  | n.a.    |
| 8     | Volvo EC 201    | est    | Votec W650     | 107            | 20,5       | -0.13983 | 0.30985 |
| 9     | TJ 1270B        | 6x6    | TJ 762C        | 163            | 17,8       | n.a.     | 0       |
| 10    | TJ 2618         | est    | TJ 762C        | 153            | 24,4       | n.a.     | 0.08971 |

TJ = Timberjack, sling = slingshot, sd = sem descascamento, cd = com descascamento, est = esteiras.

#### 2.2.4.2 Depreciação de maquinário

Utilizando-se os dados da vida útil e da massa dos implementos (12) e dos tratores e colhedoras (13) e a CcO (21) determina-se a depreciação de maquinário por área trabalhada (25) (Equação 2.17).

$$DM = \sum_i \left( \frac{Mi}{VUi} \right) \frac{1}{CcOi} \quad (2.17)$$

Em que:

DM = depreciação de maquinário ( $\text{kg ha}^{-1}$ );

$M_i$  = massa da  $i$ -ésima máquina ou implemento (kg);

$VU_i$  = vida útil da  $i$ -ésima máquina ou implemento (h);

$CcO_i$  = capacidade de campo operacional da  $i$ -ésima máquina ou implemento ( $ha\ h^{-1}$ ).

O somatório diz respeito à operação mecanizada realizada, pois a  $CcO$  de tratores e implementos que realizam uma dada operação é a mesma, sendo uma característica do conjunto motomecanizado e não exclusiva de um de seus componentes. É preferível manter separada a massa de ambos, pois alguns autores (ULBANERE, 1988) atribuem índices distintos para equipamentos com e sem motor.

#### 2.2.4.3 Mão-de-obra

Os dados de jornada e número de funcionários (11), referentes à mão-de-obra (3), juntamente com a  $CcO$  (21) permitem o cálculo da mão-de-obra despendida por área (24) cultivada (Equação 2.18).

$$MO = \frac{\#Trab}{CcO} \quad (2.18)$$

Em que:

$MO$  = dispêndio de mão-de-obra ( $h\ ha^{-1}$ );

$\#Trab$  = número de trabalhadores envolvidos na operação realizada (unidades);

$CcO$  = capacidade de campo operacional ( $ha\ h^{-1}$ ).

#### 2.2.4.4 Insumos agrícolas

Para os insumos agrícolas, foi desnecessário modelar o fluxo de material uma vez que, por serem diretamente aplicados no sistema de produção a própria recomendação dos mesmos já indica a quantidade demandada no processo produtivo.

### 2.2.5 Caracterização do sistema de produção

Para se determinar o fluxo de material e demanda de insumos utilizou-se dos dados referentes ao sistema de produção de eucalipto da Companhia Suzano Papel e Celulose nos anos 2004 e 2005. Para tanto, selecionou-se uma área representativa na região de Itatinga, estado de São Paulo (Figura 2.3), onde se avaliou um sistema de produção de eucalipto clonal, em área já cultivada. A implantação em novas áreas é inexpressiva devido à indisponibilidade das mesmas. A colheita é feita em períodos de rotação de 6 a 8 anos com média de produtividade bem uniforme na região. O incremento médio anual<sup>11</sup> (IMA) é de  $41,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , encontrando-se variações de  $19 \text{ a } 70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . A produção de biomassa é voltada para o suprimento da indústria de celulose e papel.

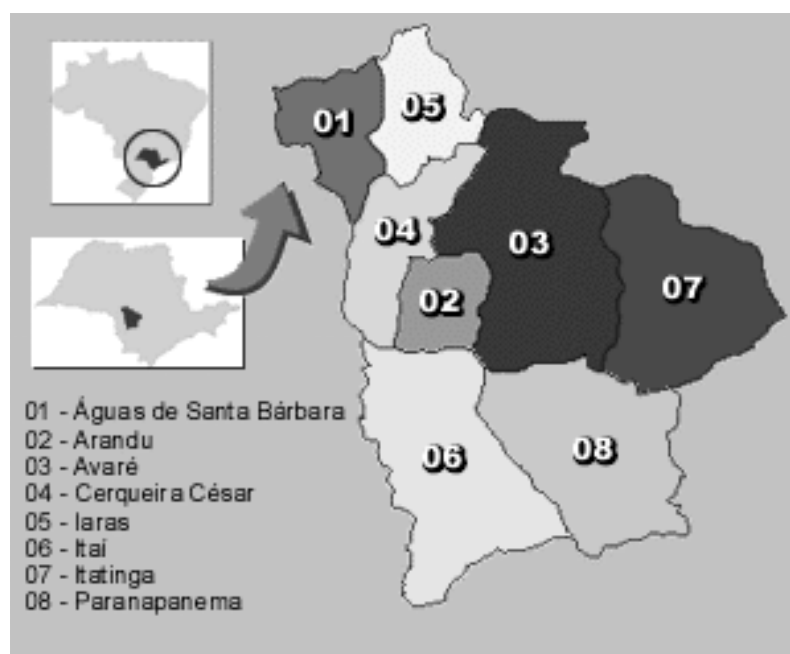


Figura 2.3 – Mapa da região de Itatinga, São Paulo

As operações de manejo dos talhões incluem correção de pH do solo (via calcário, cinzas ou biossólido), plantio, adubações (3º mês, 8º mês e 2º ano); controles fitossanitários; irrigação (após o plantio); e colheita. O fluxograma das operações realizadas no sistema de produção de Itatinga é apresentado na Figura 2.4, que mostra a sequência de realização das operações desde a correção do solo até a colheita.

<sup>11</sup> J.L. Gava e L. DiCiero, gerentes da Companhia Suzano Papel e Celulose, em comunicação pessoal.

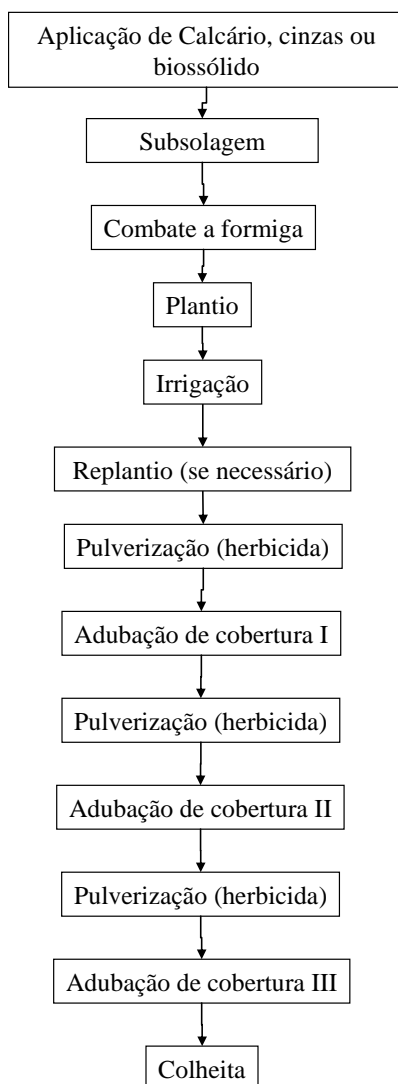


Figura 2.4 – Fluxograma das operações mecanizadas no sistema de produção avaliado

Ressalta-se que a colheita refere-se apenas ao corte e processamento realizado pelo *harvester*. Não foi considerada a operação de baldeio por esta ser terceirizada. Durante a colheita participam 50 trabalhadores divididos em 3 turnos para 2 módulos de colheita, sendo 30 operadores, 12 mecânicos, 2 encarregados, 3 afiadores e 3 auxiliares. Este total está dividido em 2 frentes de corte (módulo) e no escritório. Assim sendo considerou-se a mão-de-obra de 8,33 trabalhadores para cada frente de corte e cada turno na determinação da energia demandada pelo sistema de produção.

De acordo com a empresa, o sistema de colheita adotado apresentou as seguintes características: capacidade de colheita de  $16,04 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  e eficiência de campo de 64,87%. Considerando-se o IMA médio de  $41,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e um corte aos 7 anos ( $290,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), a frente de corte apresenta a capacidade de campo operacional de  $0,055 \text{ ha h}^{-1}$ . Quanto ao consumo de óleo combustível e lubrificante, obtiveram-se os seguintes dados:  $21,5 \text{ L h}^{-1}$  de óleo diesel;  $0,41 \text{ L h}^{-1}$  de óleo hidráulico (SAE 15W50); e  $0,84 \text{ L h}^{-1}$  de óleo de corrente.

### 2.2.6 Desenvolvimento do modelo, cenários e análise de sensibilidade

Com base no algoritmo, nas equações e nas características do sistema de produção com sistema de colheita de tora curta, foi desenvolvido o modelo em planilha eletrônica MS Excel<sup>TM</sup><sup>12</sup>.

Como cenário básico foi utilizado o sistema de produção da empresa, com a correção da acidez do solo sendo realizada através de calcário; os dados básicos utilizados constam no Anexo E. Outras duas alternativas referentes à correção de acidez foram também avaliadas quanto ao fluxo de energia e material: o uso de cinzas e de bio-sólido.

Para identificar as variáveis que mais influenciam no sistema de produção utilizou-se a análise de sensibilidade. Foram selecionadas variáveis consideradas críticas e os seus valores alterados em um percentual fixo (10%), verificando-se assim os efeitos nos indicadores. Essa técnica foi proposta por Noronha (1981) e utilizada na gestão de sistemas mecanizados por Milan (1992). Tal análise tem o potencial de servir de base para a implementação de alterações no sistema de produção de eucalipto a fim de melhorar a sustentabilidade da produção de biomassa.

Para se entender a sensibilidade do resultado das análises às mudanças nas operações comumente realizadas, sugeriu-se alterações no uso de mão-de-obra, insumos agrícolas, maquinário e também no gerenciamento das operações para o cenário tradicional (calcário como corretor de acidez). Alterou-se o cenário original para propor os seguintes cenários:

- +EC, cenário onde a eficiência de campo é elevada em 10%,
- -Pot, cenário onde a potência do motor de máquinas autopropelidas é reduzida em 10%,
- +VU, cenário onde a vida útil do maquinário é elevada em 10%,

---

<sup>12</sup> A indicação não significa recomendação de uso pelo autor.

- -MO, cenário onde a mão-de-obra requerida foi reduzida em 10%, e
- -Ins, cenário onde todos os insumos agrícolas (com exceção das mudas) foram reduzidos em 10%.

O cenário +EC poderia ocorrer se o conjunto trator-implemento ou a colhedora operasse em 10% a mais de área no mesmo período. Isso pode ser obtido através do formato do talhão mais apropriado e/ou reduções das manobras de cabeceira. O cenário –Pot foi proposto para se avaliar os efeitos na redução da demanda de energia. O cenário +VU visou medir os efeitos de uma melhor manutenção e/ou melhoria na durabilidade. O cenário –MO explorou a sensibilidade do sistema às mudanças na demanda de trabalho humano. Finalmente, na alternativa –Ins, explorou-se os efeitos da redução de todos os insumos agrícolas diretamente aplicados, com exceção das mudas. Esta alteração mede a influência dos insumos utilizados na energia de entrada e pode evidenciar a importância de soluções menos intensas em energia para a produção florestal, tal como o melhoramento genético.

### 2.2.7 Resultados e Discussão

A verificação da rotina de cálculo foi realizada durante as etapas intermediária e final do trabalho para identificar eventuais erros. Ela foi efetuada através da comparação dos valores determinados manualmente em cada etapa da rotina para cada operação mecanizada. Os dados necessários para a entrada no modelo foram obtidos a partir do banco de dados da empresa. Na validação foi verificada a consistência dos resultados obtidos pelo modelo, através da comparação desses resultados com os obtidos pela bibliografia.

#### Validação

Para se validar os resultados obtidos através do uso do modelo buscou-se dados disponíveis em referências bibliográficas. Tanto a intensidade energética de biomassa (Figura 2.5) quanto à energia de entrada (Figura 2.6) foram os indicadores utilizados para tal comparação.



O resultado das alternativas calagem, cinzas e biofóssido ficaram entre o menor valor (MATTSSON, 1979) e o maior (BERG e LINDHOLM, 2005) encontrados na bibliografia. Embora a magnitude seja considerável, de 123,8 a 200 MJ m<sup>-3</sup> (acréscimo de 61,6%), os 26 anos que separam os trabalhos dos autores citados mostram a intensificação do uso do solo na Suécia onde ambos os trabalhos foram realizados. O cenário básico (calagem) obteve a intensidade energética 0,7% superior ao valor mínimo encontrado (MATTSSON, 1979) e 16,9% e 37,7% inferior aos limites inferior e superior de Berg e Lindholm (2005), respectivamente. O modelo apresentou resultados condizentes com as referências e apenas o cenário biofóssido obteve um valor próximo ao máximo encontrado, mesmo estando em uma região tropical mais propícia ao desenvolvimento vegetal. Isso se deve a metodologia empregada que considera a composição desse resíduo para a determinação de seu conteúdo energético.

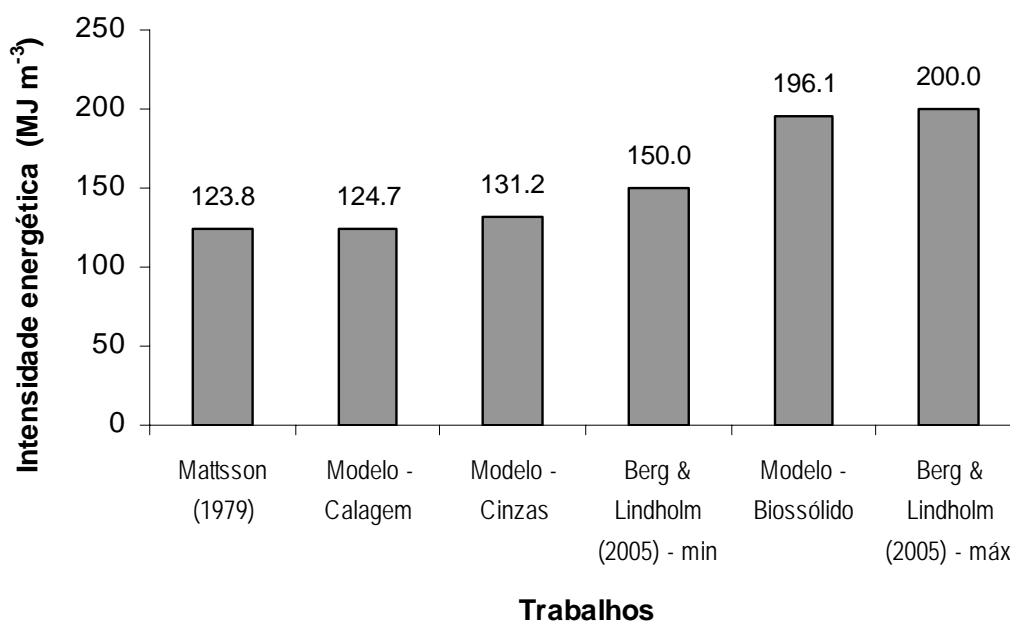


Figura 2.5 – Comparação dos resultados de intensidade energética obtidos pelo modelo comparados com a bibliografia

Ao se comparar a energia de entrada dos sistemas de produção, os resultados obtidos se aproximaram da referência mais atual (FERREIRA, 1999). O maior nível de energia demandada pelos sistemas de produção mais recentes deve ser devido à adoção mais intensiva de insumos e

maquinário em relação a sistemas adotados quando, por exemplo, Serra et al (1979) realizaram suas análises. Novamente o cenário bio-sólido destoa dos demais, sendo 39,3% maior que o segundo cenário mais demandante (Figura 2.6). Isso ocorre em função do maior nível de nitrogênio na sua composição, o nutriente mais energeticamente intenso e da grande quantidade aplicada ( $7700 \text{ kg MS ha}^{-1}$ ).

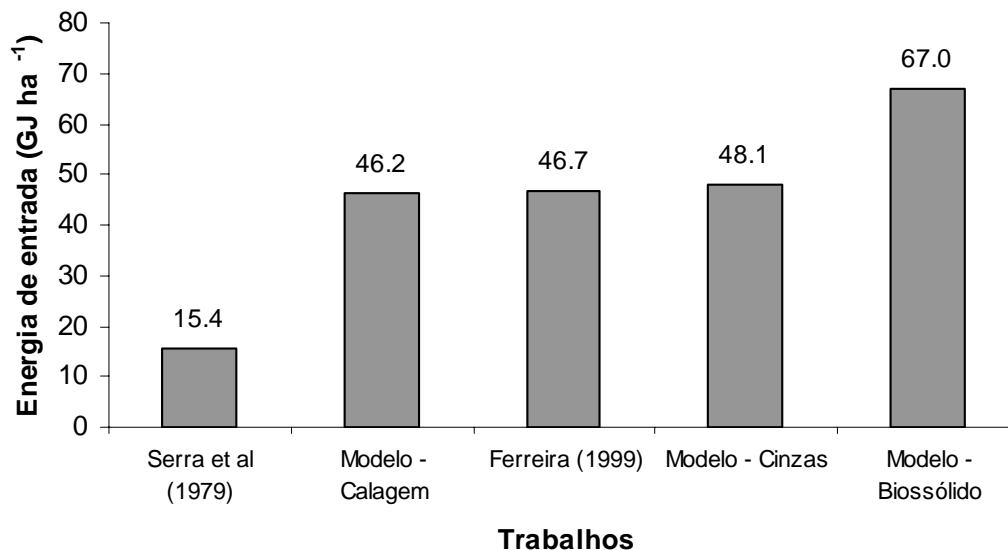


Figura 2.6 – Comparação dos resultados de energia de entrada obtidos pelo modelo comparados com a bibliografia

### Cenário básico

Utilizando-se o modelo elaborado para o cenário básico determinou-se os fluxos de material demandados na produção de eucalipto. Esses fluxos listam os insumos indiretamente utilizados no sistema de produção, combustível, depreciação energética do maquinário e mão-de-obra. Esses fatores de produção, por serem utilizados em todas as operações, são somados indicando o seu consumo total. Os insumos diretamente aplicados são determinados pela recomendação técnica. (Tabela 2.2).

Determinou-se os fluxos para todas as operações mecanizadas (Tabela 2.2). De todas as operações, a subsolagem foi a única na qual foram aplicados dois insumos distintos (herbicida e fertilizante). A colheita apresentou valores de grande magnitude de consumos dos insumos indiretamente aplicados em função da baixa CcO ( $0,055 \text{ ha h}^{-1}$ ).

Os valores dos fluxos de material agrupados por tipo de insumo e seus respectivos índices de energia são apresentados na Tabela 2.3. O produto destes dois valores representa o fluxo de energia aplicado no sistema de produção, que também é apresentada em base anual para facilitar comparativos com sistemas de produção de biomassa em períodos de rotação distintas. Para relacionar os fluxos à base anual, considerou-se o valor total dos fluxos pelo número de anos da rotação.

Tabela 2.2 – Fluxo de material na produção de eucalipto

| Operações                         | Combustível<br>L ha <sup>-1</sup> | Depreciação<br>energética<br>kg ha <sup>-1</sup> | Mão-de-<br>obra<br>h ha <sup>-1</sup> | Insumos             |            |                       |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------|------------|-----------------------|
|                                   |                                   |  |                                       | Tipo                | Quantidade | Unidade               |
| Calagem                           | 3,1                               | 0,17   | 1,04                                  | Calcário            | 1000       | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Subsolagem                        | 9,5                               | 0,43   | 2,85                                  | Herbicida           | 1          | L ha <sup>-1</sup>    |
|                                   |                                   |  |                                       | Fertilizante I      | 260        | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Sulcação                          | 4,3                               | 0,54   | 0,98                                  |                     |            |                       |
| Plantio                           | 1,9                               | 0,28   | 10,29                                 | Mudas               | 1790       | unid ha <sup>-1</sup> |
| Irrigação                         | 12,8                              | 0,28   | 14,29                                 | água                | 5556       | L ha <sup>-1</sup>    |
| Pulverização (herbicida)          | 1,9                               | 0,27   | 1,96                                  | Herbicida           | 3          | L ha <sup>-1</sup>    |
| Adubação de cobertura (30<br>mês) | 2,4                               | 0,18   | 1,06                                  | Fertilizante II     | 150        | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Pulverização (herbicida)          | 1,0                               | 0,05   | 0,44                                  | Herbicida           | 1,8        | L ha <sup>-1</sup>    |
| Adubação de cobertura (80<br>mês) | 3,5                               | 0,29   | 1,06                                  | Fertilizante<br>III | 150        | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Pulverização (herbicida)          | 1,0                               | 0,05   | 0,33                                  | Herbicida           | 1,8        | L ha <sup>-1</sup>    |
| Adubação de cobertura (20<br>ano) | 3,5                               | 0,29   | 1,06                                  | Fertilizante II     | 250        | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Colheita                          | 479,2                             | 11,82  | 169,09                                | Óleo lubr.          | 22,8       | L ha <sup>-1</sup>    |
| Combate à formiga                 | 0,0                               | 0,00   | 16,67                                 | Isca                | 1          | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Replântio                         | 5,2                               | 0,16   | 10,29                                 | Mudas               | 55         | unid ha <sup>-1</sup> |
| <b>Total</b>                      | <b>529,2</b>                      | <b>14,8</b>                                      | <b>231,4</b>                          | -                   | -          | -                     |

Fertilizante I é a formulação 06-30-10; fertilizante II é a formulação 14-00-15 e o fertilizante III é o KCl. Óleo lubr. refere-se aos óleos hidráulico e lubrificante utilizados.

Tabela 2.3 – Análise de energia do sistema de produção avaliado

| Insumos                 | Fluxo de material        |                | Índice energético     | Fluxo de energia    |                                       |
|-------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------------|
|                         | Quantidade               | Unidade        |                       | Total               | Anualizado                            |
|                         | unidade ha <sup>-1</sup> |                | MJ unid <sup>-1</sup> | MJ ha <sup>-1</sup> | MJ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> |
| Combustível             | 529,2                    | L              | 38,6                  | 20399,7             | 2914,2                                |
| Maquinário              | 14,8                     | kg             | 68,9                  | 1021,1              | 145,9                                 |
| Mão de obra             | 231,4                    | h              | 2,2                   | 509,1               | 72,7                                  |
| Fertilizante I          | 260,0                    | kg             | 8,9                   | 2308,8              | 329,8                                 |
| Fertilizante II         | 400,0                    | kg             | 12,4                  | 4960,0              | 708,6                                 |
| Formicida               | 1,0                      | kg             | 184,7                 | 184,7               | 26,4                                  |
| Fertilizante III        | 150,0                    | kg             | 7,2                   | 1078,5              | 154,1                                 |
| Lubrificante            | 22,8                     | L              | 38,6                  | 878,6               | 125,5                                 |
| Herbicida               | 7,6                      | L              | 327,0                 | 2485,4              | 355,1                                 |
| Mudas                   | 922,5                    | unidade        | 0,8                   | 711,2               | 101,6                                 |
| Água                    | 5556,0                   | kg             | 0,0                   | 27,4                | 3,9                                   |
| Calcário                | 1000,0                   | kg             | 1,7                   | 1670,0              | 238,6                                 |
| Energia de Entrada (EE) |                          |                |                       | 36234,5             | 5176,4                                |
| <i>Produto</i>          |                          |                |                       |                     |                                       |
| Biomassa colhida (ES)   | 290,5                    | m <sup>3</sup> | 7425                  | 2156962,5           | 308138                                |

Fertilizante I é a formulação 06-30-10; fertilizante II é a formulação 14-00-15 e o fertilizante III é o KCl.

A energia de entrada foi de 36234,5 MJ ha<sup>-1</sup> (36,2 GJ ha<sup>-1</sup>) enquanto que a energia de saída, determinada através da biomassa colhida, foi de 2156962,5 MJ ha<sup>-1</sup> (2157,0 GJ ha<sup>-1</sup>). Assim o EROI resultante foi de 58,5 MJ MJ<sup>-1</sup> (Tabela 2.4). Para comparação com outras fontes alternativas de energia o resultado anualizado foi 8,4 MJ MJ<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. O balanço de energia, que avalia a energia líquida resultante do processo produtivo foi de 2120,7 GJ ha<sup>-1</sup> (303,0 GJ ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) e a intensidade energética da biomassa produzida foi de 124,7 MJ m<sup>-3</sup>.

Tabela 2.4 – Índices de eficiência energética do sistema de produção estudado

| Índice                 | Valor  | Unidade                               |
|------------------------|--------|---------------------------------------|
| EROI                   | 58,5   | MJ MJ <sup>-1</sup>                   |
| EROI ano <sup>-1</sup> | 8,4    | MJ MJ <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> |
| IE                     | 124,7  | MJ m <sup>-3</sup>                    |
| BE                     | 2120,7 | GJ ha <sup>-1</sup>                   |
| BE ano <sup>-1</sup>   | 303,0  | GJ ha <sup>-1</sup>                   |

Embora esses números dêem à impressão de que a plantação de eucalipto é uma fonte eficiente de energia, deve-se ressaltar que essa análise só abrange os insumos adquiridos no mercado, não contabilizando as condições edafoclimáticas e hídricas que propiciam o potencial produtivo apresentado. Para fins práticos, considerando-se a insolação média da região (808,05 cal cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> ou 3909 kJ ha<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> no SI), ao longo de sete anos de cultivo, a energia solar total aplicada ao sistema seria de 8,56E8<sup>13</sup> MJ. Esse valor totaliza 2,36E5 vezes mais energia de entrada via insumos para a produção de um hectare de eucalipto ou ainda 397 vezes mais que o potencial calorífico da madeira produzida.

Os valores obtidos pelos indicadores, considerando-se a energia solar incidente na área cultivada (Tabela 2.5), estão de acordo com a segunda lei da termodinâmica, onde toda transformação de uma forma de energia em outra, promove a perda de energia (aumento da entropia). A maioria dos autores, quando discutem assuntos como energia alternativa, renovável e bioenergia, desconsideram que não existe geração de energia, como os números que omitem a energia solar mostram na Tabela 2.4. O que existe é a disponibilização de energia, que se dá através de transformações, sendo que cada transformação implica em perda quantitativa de energia.

<sup>13</sup> A letra E indica potência de 10, assim 2E3, por exemplo, equivale a 2 x 10<sup>3</sup>.

Tabela 2.5 – Índices de eficiência energética considerando-se a energia solar

| Índice                 | Valor     | Unidade                               |
|------------------------|-----------|---------------------------------------|
| EROI                   | -1,0      | MJ MJ <sup>-1</sup>                   |
| EROI ano <sup>-1</sup> | -0,1      | MJ MJ <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> |
| Energia incorporada    | 2,95E+09  | GJ m <sup>-3</sup>                    |
| BE                     | -8,54E+08 | GJ ha <sup>-1</sup>                   |
| BE ano <sup>-1</sup>   | -1,22E+08 | GJ ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> |

A quantidade líquida disponibilizada (BE) por uma fonte de energia e a “lucratividade” energética (EROI) são igualmente importantes, porém em ambos indicadores o tempo necessário para a obtenção do produto final não é contemplado. Com isso os índices anualizados permitem a comparação de diferentes sistemas de produção que ultrapassem um ano de duração, porém eles superestimam as culturas agrícolas, que são cultivadas nos meses mais propícios climaticamente e esse período não se repete ao longo de todo ano.

Assim, visando propor um indicador que possa não apenas quantificar a energia disponibilizada, mas também considerar o tempo necessário para a obtenção do produto final, calculou-se a potência do sistema de produção de eucalipto. Os 2,15E6 MJ ha<sup>-1</sup> disponibilizados foram divididos pelo período necessário à produção (2,2E8 s), indicando que o sistema apresenta uma potência de 9,76 kW. Considerando-se a insolação incidente no mesmo hectare chegou-se a potência da energia solar de 3875 kW, considerando as 24 h do dia e não somente as horas de insolação.

#### Cenários referentes às alternativas de correção de acidez

Além do uso de calcário como regulador da acidez do solo, o sistema de produção avaliado apresenta a possibilidade de fazer uso de materiais alternativos, cinzas e biossólido, cujas características são apresentadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Características dos materiais alternativos para a correção de acidez do solo

| Item       | Quantidade          | Índice energético | Fluxo de energia    |                     |
|------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
|            | kg ha <sup>-1</sup> |                   | MJ kg <sup>-1</sup> | MJ ha <sup>-1</sup> |
| Cinzas     | 3000,0              | 1,18              | 3540                | 505,7               |
| Biossólido | 7700,0              | 2,91              | 22407               | 3201,0              |

Os índices do conteúdo energético dos materiais alternativos foram determinados em função do teor de nutrientes (NPK: nitrogênio, fósforo e potássio). Essa forma de estimativa não parece ser a mais apropriada, pois o conteúdo de NPK pode não revelar o real conteúdo energético do material, mas sim relacionar com a demanda de energia para se sintetizar ou extrair o equivalente em fertilizantes. No entanto, essa estimativa é a mais difundida para fertilizantes orgânicos ou resíduos utilizados (LOPES e GUIMARÃES, 1989) e foi utilizada. Mesmo contendo NPK em sua composição quando se utiliza dessas alternativas a empresa não altera o planejamento das adubações.

Em função da quantidade aplicada dos materiais alternativos, o fluxo de energia de entrada sofreu um acréscimo, tornando estas alternativas menos atraentes ambientalmente de acordo com os indicadores utilizados (Tabela 2.7). A energia de entrada foi 5,2% e 57,2% maior para cinzas e biossólido, respectivamente. As mesmas diferenças foram observadas para a intensidade energética da biomassa. O EROI calculado foi 95,0% e 63,1% do alcançado pelo cenário calcário, respectivamente para cinzas e biossólido. O balanço de energia sofreu decréscimo de menos de 1% para ambos.

Tabela 2.7 – Comparativo entre alternativas de correção de acidez do solo

| Alternativas | Energia de entrada  | IE    | EROI | BE     |
|--------------|---------------------|-------|------|--------|
|              | MJ ha <sup>-1</sup> |       |      |        |
| Calcário     | 36234,5             | 124,7 | 58,5 | 2120,7 |
| Cinzas       | 38104,5             | 131,2 | 55,6 | 2118,9 |
| Biossólido   | 56971,5             | 196,1 | 36,9 | 2100,0 |

Uma alternativa para melhor comparar o uso de cinzas ou biossólido é considerar uma escala mais ampla, pois ao fazer uso de materiais que seriam descartados, elimina-se a demanda por aterros, transporte e locais para acumulação do material. Isso é necessário para que, ao se comparar os fluxos de energia, houvesse uma abordagem dos efeitos indiretos e assim se determina qual seria a mais ambientalmente adequada.

A participação dos insumos na energia de entrada nos cenários distintos apresenta diferenças somente devido aos materiais utilizados para a correção da acidez do solo, principalmente pelo conteúdo energético deles. O acréscimo no consumo de combustível, depreciação energética de maquinário e mão-de-obra em função da menor capacidade de campo operacional (CcO) das operações alternativas à calagem não alteram a magnitude do valor total (Figura 2.7).

O combustível e os fertilizantes são responsáveis por 79,3% da energia demandada, com a utilização de calcário ao redor de 75% para os cenários cinzas e biossólido. O combustível foi o principal insumo demandante de energia, com aproximadamente três vezes mais energia que os fertilizantes. Sendo o combustível um insumo indiretamente utilizado, ressalta-se assim a importância em se monitorar como os insumos são aplicados e não apenas o quanto se aplica, como no caso dos fertilizantes, utilizados diretamente no sistema de produção. Optou-se por tratar os fertilizantes 06-30-10, 14-00-15 e KCl como um bloco, dentro do qual eles representaram 27,7%, 59,4% e 12,9% da energia contida, respectivamente.



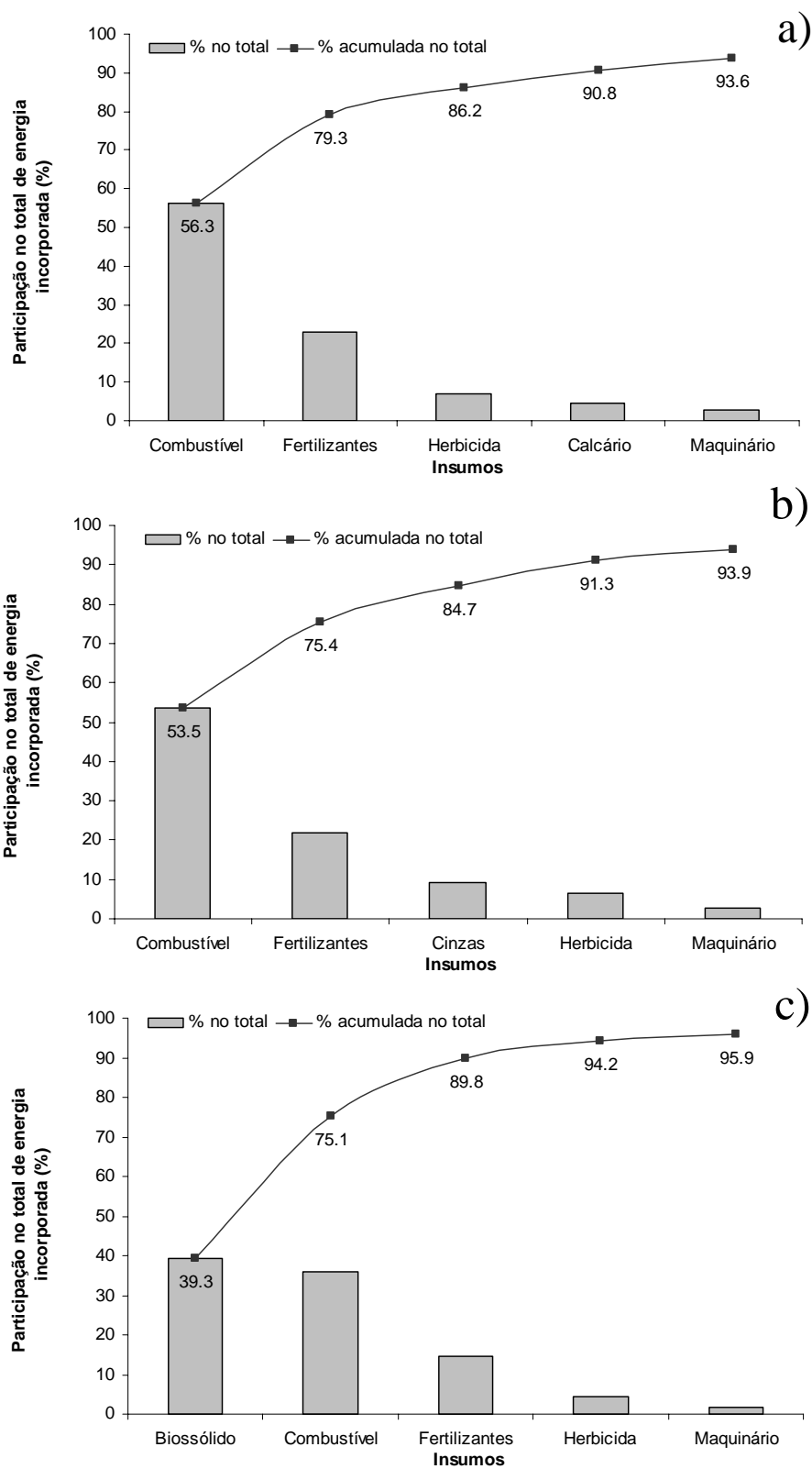


Figura 2.7 – Participação dos insumos na energia de entrada, nos cenários: calcário (a), cinzas (b) e biossólido (c)

### Operações mecanizadas

Para se detalhar o sistema de produção com relação às operações mecanizadas e insumos direta (insumo) e indiretamente (combustível, depreciação energética e mão-de-obra) aplicados, utilizou-se os dados do cenário calcário (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 – Demanda energética por operação e classe de insumo

| Operação mecanizada                    | Demanda energética |                        |             |             | Total        |
|--|--------------------|------------------------|-------------|-------------|--------------|
|  | Combustível        | Depreciação energética | Mão-de-obra | Insumo      |              |
|  | ----- % -----      |                        |             |             |              |
| Calagem                                | 0,3                | 0,0                    | 0,0         | 4,6         | <b>5,0</b>   |
| Subsolagem (+ adubação e pulverização) | 1,0                | 0,1                    | 0,0         | 7,3         | <b>8,4</b>   |
| Sulcação                               | 0,5                | 0,1                    | 0,0         | 0,0         | <b>0,6</b>   |
| Plantio                                | 0,2                | 0,1                    | 0,1         | 1,9         | <b>2,2</b>   |
| Irrigação                              | 1,4                | 0,1                    | 0,1         | 0,1         | <b>1,6</b>   |
| Pulverização (herbicida)               | 0,2                | 0,1                    | 0,0         | 2,7         | <b>3,0</b>   |
| Adubação de cobertura (3º mês)         | 0,3                | 0,0                    | 0,0         | 5,1         | <b>5,4</b>   |
| Pulverização (herbicida)               | 0,1                | 0,0                    | 0,0         | 1,6         | <b>1,7</b>   |
| Adubação de cobertura (8º mês)         | 0,4                | 0,1                    | 0,0         | 3,0         | <b>3,4</b>   |
| Pulverização (herbicida)               | 0,1                | 0,0                    | 0,0         | 1,6         | <b>1,7</b>   |
| Adubação de cobertura (2º ano)         | 0,4                | 0,1                    | 0,0         | 8,6         | <b>9,0</b>   |
| Colheita                               | 51,0               | 2,2                    | 1,0         | 2,4         | <b>56,7</b>  |
| Combate à formiga                      | 0,0                | 0,0                    | 0,1         | 0,5         | <b>0,6</b>   |
| Replantio                              | 0,5                | 0,0                    | 0,1         | 0,1         | <b>0,7</b>   |
| <b>Total</b>                           | <b>56,3</b>        | <b>2,8</b>             | <b>1,4</b>  | <b>39,5</b> | <b>100,0</b> |

Dos quatro fatores de produção, combustível e insumos representam quase a totalidade da demanda energética (95,8%), sendo os fatores que devem ser primeiramente considerados para a melhoria da eficiência ambiental, no tocante a energia.

Os índices de mão-de-obra são determinados única e exclusivamente pela demanda energética física do trabalhador. Porém, considerar-se apenas as horas de trabalho realizadas pode não ser o mais correto, uma vez que o ser humano não trabalha 100% do seu tempo. Cada hora trabalhada exige algum tempo de descanso, alimentação e lazer, que podem ser considerados como

atividades suplementares, e igualmente importantes, à atividade principal – trabalho. No presente estudo considerou-se as horas destinadas exclusivamente ao trabalho.

No que se refere às operações mecanizadas, componentes do sistema de produção, a colheita é indubitavelmente a mais importante. A magnitude dos valores determinados para a colheita se deve principalmente a baixa capacidade de campo operacional ( $0,055 \text{ ha h}^{-1}$ ) que faz com que os valores de consumo horário de multipliquem pelas 18,2 horas necessárias para se colher um único hectare.

Além da colheita, o combustível também tem destaque na irrigação em função do uso de caminhões pipa no suporte à operação. Excetuando-se essas operações, apenas os insumos diretamente aplicados recebem destaque, principalmente os fertilizantes aplicados na subsolagem e adubações de cobertura. Embora apresentem índices energéticos elevados ( $0,8E2$  a  $4,5E2 \text{ MJ L}^{-1}$ ) os defensivos não somam grande parte da demanda por se utilizar pequeno volume por área.

Considerando-se simultaneamente os fatores de produção (quatro) e as operações mecanizadas (quatorze) quanto à demanda energética, obteve-se 56 componentes dos quais, os 10,7% mais demandantes deles representam 79,6% da demanda total (Tabela 2.9). Esses fatores de produção constituem-se no grupo que mereceria maior atenção na busca pela melhoria da eficiência ambiental do sistema de produção, enfatizando a necessidade de identificá-los para que esforços em melhoria fossem concentrados nos principais causadores dos efeitos monitorados.

#### Análise de sensibilidade

Realizou-se a análise de sensibilidade como meio de quantificar o grau em que as alterações no manejo florestal afetariam a eficiência ambiental, utilizando-se a energia de entrada como medida da demanda de recursos. Relacionou-se todos os cenários em função da Tabela 2.3 (Pág. 51), e em cada caso avaliou-se os resultados obtidos através da alteração em 10% nos fatores de produção.

O aspecto mais notável da análise foi o grau em que as decisões sobre o manejo de acidez do solo se sobressaem frente às outras abordagens para melhoria na eficiência ambiental. A maior

diferença observada dentro de cada esquema de manejo de acidez de solo foi de até 5,3% (Tabela 2.10). A diferença atribuída à escolha do corretor de acidez do solo foi de até 55,6%.

Tabela 2.9 – Demanda de energia dos componentes do sistema de produção

| Ordem | Classe e operação                                      | Participação | Acumulado na | Acumulado dos |
|-------|--|--------------|--------------|---------------|
|       |  | na energia   | energia      | componentes   |
|       |  | -----        | %            | -----         |
| 1     | Colheita - Combustível                                 | 51,0         | 51,0         | 1,8           |
| 2     | Adubação de cobertura (2º ano) - Insumos               | 8,6          | 59,6         | 3,6           |
| 3     | Subsolagem (+ adubação e pulverização herb.) - Insumos | 7,3          | 66,9         | 5,4           |
| 4     | Adubação de cobertura (3º mês) - Insumos               | 5,1          | 72,0         | 7,1           |
| 5     | Calagem – Insumos                                      | 4,6          | 76,6         | 8,9           |
| 6     | Adubação de cobertura (8º mês)                         | 3,0          | 79,6         | 10,7          |

A maior melhoria (5,3%) no desempenho foi observada pelo aumento da eficiência de campo (cenário +EC), que envolveria o aumento desse fator sem aumentar o consumo de outros insumos. Se fosse alcançado esse nível de melhoria, mão-de-obra, depreciação e combustível por unidade de área seriam reduzidos, pois todos são relacionados com a capacidade de campo operacional (CcO). Diversos mecanismos tornam essa abordagem possível. Por exemplo, a eficiência de campo pode ser melhorada pela definição de formato de talhões mais apropriados, minimizando tempo de manobras.

Outro cenário que obteve destaque foi o de redução de insumos agrícolas (-Ins) com uma resposta similar (4,0%) ao cenário com melhor eficiência de campo (+EC). Para a redução do uso de insumos, vale ressaltar técnicas como a adubação localizada (PIERCE e NOWARK, 1999) que apresentam grande potencial de serem implementadas nas operações florestais.

Os demais cenários, aumento da vida útil de maquinário (+VU), redução de demanda de mão-de-obra (-MO), redução da potência do maquinário utilizado (-Pot), não modificaram consideravelmente a eficiência global do processo. Consequentemente, esses não seriam fatores

produtivos que mereceriam destaque, em uma primeira aproximação, ao se buscar a melhoria da eficiência ambiental.

Tabela 2.10 – Demanda energética das alternativas de manejo propostas nos cenários de correção da acidez do solo

| Cenários | Alternativas |        |            |
|----------|--------------|--------|------------|
|          | Calcário     | Cinzas | Biossólido |
| Original | <b>100</b>   | 105,1  | 155,6      |
| +EC      | 94,7         | 99,7   | 150,2      |
| -Pot     | 99,9         | 105,0  | 155,5      |
| +VU      | 99,8         | 104,8  | 155,3      |
| -MO      | 99,9         | 104,9  | 155,4      |
| -Ins     | 96,0         | 100,6  | 146,1      |

A energia de entrada do cenário original foi considerada como base 100.

+EC indica cenário com eficiência de campo 10% maior; -Pot indica cenário que utilizou frota com 10% menos potência; +VU indica o aumento da vida útil de maquinário em 10%, -MO indica a redução do uso de mão-de-obra em 10% e -Ins indica a redução do uso de insumos (exceto mudas) em 10%.

Um importante aspecto a ressaltar com relação aos resultados é que mesmo pequenas diferenças na eficiência podem ter implicações substanciais no uso de recursos. Embora a avaliação tenha sido executada para uma propriedade ou talhão, não se deve esquecer que as operações são realizadas em milhares de hectares no país, logo, mesmo ganhos percentuais pequenos podem ter significância no valor absoluto.

Embora o consumo de combustível seja um importante fluxo na contabilidade energética do sistema de produção avaliado, a redução de potência (-Pot) da frota utilizada não resultou em grande diminuição da energia demandada, pois ao se reduzir a potência disponível se eleva a razão de uso de potência, e conseqüentemente o consumo específico. O consumo específico juntamente com a potência requerida pelo implemento são as variáveis que determinam o consumo horário.

### 2.3 Conclusões

O modelo elaborado foi considerado adequado para se determinar o fluxo e o desempenho energético de sistemas de produção de eucalipto. Os resultados obtidos para o cenário básico avaliado estiveram dentro da abrangência encontrada na bibliografia. Os valores para os indicadores empregados foram EROI de  $58,5 \text{ MJ MJ}^{-1}$  ( $8,4 \text{ MJ MJ}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), a intensidade energética da biomassa foi de  $124,7 \text{ MJ m}^{-3}$  e o balanço de energia foi de  $2120,7 \text{ GJ ha}^{-1}$  ( $303,0 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ).

Considerando-se a energia solar incidente durante o ciclo da rotação a eficiência de transformação de energia é inferior a 100%, em função da irreversibilidade dos processos (entropia). Os indicadores de EROI e balanço de energia foram negativos e a intensidade energética atingiu por volta de  $3 \times 10^{12} \text{ MJ m}^{-3}$ . Visando relacionar a disponibilização de energia e o tempo necessário para o processo, sugeriu-se um indicador denominado potência de fonte de energia, que, para a biomassa estudada, foi de  $9,76 \text{ kW}$ . O sol apresenta potência de  $3875 \text{ kW}$ .

As alternativas de correção de acidez do solo através das cinzas e do bio-sólido mostraram-se menos eficientes que a tradicional, calcário. Porém o fato de serem considerados seus conteúdo de nutrientes como determinante do conteúdo de energia pode superestimar a energia de entrada. Em uma escala mais ampla, a demanda por aterrar tais materiais deveria ser contabilizada. Com isso tem-se um benefício indireto ao se utilizar tais resíduos.

Dentre das categorias de insumo avaliadas os insumos agrícolas e o combustível são os principais determinantes do fluxo de energia. As plantas com características genéticas que permitam uma maior dependência de insumos ou cujo acréscimo percentual de produtividade supere o de demanda em energia são alternativas para a melhoria da eficiência energética. As operações de maior demanda também devem ser gerenciadas de modo a diminuir o consumo de combustível necessário para sua execução.

No tocante às operações, a colheita é a mais importante na demanda energética, pela baixa capacidade de campo operacional apresentada, tornando os insumos indiretamente aplicados mais representativos nela, do que nas demais operações. Além da colheita, as operações que envolvem a aplicação de fertilizantes, subsolagem e adubações de cobertura, também tiveram destaque no conteúdo energético.

A análise de sensibilidade indicou que o tipo de material usado para regular a acidez do solo foi mais importante que os cenários propostos em si. Das opções propostas o cenário onde houve aumento da eficiência de campo foi a que surtiu mais efeito no aumento da eficiência produtiva do sistema e o cenário que estabeleceu a redução de insumos, com exceção das mudas, propiciou a segunda melhor reposta. Deve-se ressaltar que, em virtude da magnitude da área cultivada com eucalipto no país, mesmo pequenos percentuais em melhoria podem resultar em um valor absoluto considerável de economia de recursos.

## Referências

ALMEIDA, F.M. **Avaliação da energia investida na cultura de milho e das perdas pós-produção**. Botucatu: UNESP, 1985. 16p.

AMERICAN SOCIETY de AGRICULTURAL ENGINEERS. D496.2 Agricultural Machinery Management. **ASAE Standards 2003**. 2003a. p.367-372.

AMERICAN SOCIETY de AGRICULTURAL ENGINEERS. D497.4 Agricultural Machinery Management Data. **ASAE Standards 2003**. 2003b. p.272-280.

ANGELINI, L.G., CECCARINI, L.; BONARI, E. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 22, n.4, p. 375-389, May 2005.

BERG, S.; LINDHOLM, E.L. Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v.13, n.1, p.33-42, Jan. 2005.

BRAMUCCI, M. **Determinação e quantificação de fatores de influência sobre a produtividade de "harvesters" na colheita de madeira**. 2001. 50p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

CASTANHO FILHO, E.P.; CHABARIBERY, D. Perfil energético da agricultura paulista. **Agricultura em São Paulo**. São Paulo, v.30, n.1/2, p.63-116, 1983.

FERRARO JÚNIOR, L.A. **Proposição de método de avaliação de sistemas de produção e de sustentabilidade**. 1999. 132p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

FERREIRA, O.C. Análise exergética da agricultura. **Economia & Energia**, São Paulo, v.3, n.12, mar/abr. 1999. <http://ecen.com/eee12/agricop.htm>

FLUCK, R.C.; BAIRD, C.D. **Agricultural energetics**. Gainesville: University of Florida/Agricultural Engineering Department and Institute de Food and Agricultural Sciences, 1982. 197p.

GEORGESCU-ROEGEN, N. Energy and economic myth. **Southern Economic Journal**, Chapel Hill, v.41, n. 3, p.347-381, Jan 1975

HALL, C.A.S. The myth of sustainability development – personal reflection on energy, its relation to neoclassical economics and Stanley Jevons. **Journal of Energy Resource Technology**. New York, v.126, n.2, p.85-89, Jun. 2004.

HETZ, E.J.; VILLEGAS, H.B.; RIQUELME, J.S.; CELIS, J.H. Utilizacion de energia en la produccion de raps, bajo cuatro sistemas de labranza, en la Provincia de Ñuble. **Agro Sur**, Valdivia, v.22, n.1, p.1-6, jan. 1994.



MATTSSON, J.E. Energy of forest machines and in Swedish forestry as a whole. In: SEMINAR ON ENERGY ASPECTS OF THE FOREST INDUSTRIES, 1979, Udine. **Proceedings...** Oxford: Pergamon Press, 1979. p.321-330.

MILAN, M. **Improving operational management of harvest, transport and mechanization for sugar-cane in Brazil.** 1992. 226p. Thesis (PhD in Agricultural Engineering) – Silsoe College, Crainfield Institute de Technology, Silsoe, 1992.

MOLINA JUNIOR, W.F. **Enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): avaliação dos desempenhos operacional e econômico.** 1991. 101p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

NORONHA, J.F. Projetos agropecuários: administração financeira, orçamento e viabilidade econômica. São Paulo: Atlas, 1981. 274p.

OLIVEIRA JUNIOR, E.D. **Análise energética de dois sistemas de colheita mecanizada de eucalipto.** 2005. 76p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

OZKAN, B.; ARCAOZ, H.; FERT, C. Energy input-output analysis in Turkish agriculture. **Renewable energy**, Oxford, v. 29, p.39-51, 2004.

PIMENTEL, D. **Handbook of energy utilization in agriculture.** Boca Raton: CRC Press. 1980. 475p.

SERRA, G.E.; HEEZEN, A.M.; MOREIRA, J.R.; GOLDEMBERG, J. **Avaliação da energia investida na fase agrícola de algumas culturas.** Brasília: Secretaria de Tecnologia Industrial, 1979. 86p.

SILVA, V.; REIS FILHO, J.C.G; CAMARGO, J.R.V. Balanço energético das culturas de feijão e milho segundo o uso de tração animal e motomecanizada, Estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.17, n.4. p.23-35, abr. 1987.

SINGH, S.; SINGH, G. Energy input vs crop yield relationship for four major crops of northern India. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Tokyo, v.23, n.2, p. 57-62, Feb. 1992.

SIQUEIRA, R.; GAMERO, C.A.; BOLLER, W. Balanço de energia na implantação e manejo de plantas de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.19, n.1, p.80-89, set. 1999.

SOUZA, E.G; MILANEZ, L.F. Conservação de energia no uso de tratores na agricultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19, 1996, Piracicaba. **Anais...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. p.712-726.

STOUT, B.A.; MYERS, C.A. Energy for worldwide agriculture. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Tokyo, v.10. n.3, p.11-18, Oct. 1979.

TAINTER, J.A. Complexity, problem solving and sustainable societies. In: OLSON, J.M.F.; CONSTANZA, R.; SEGURA, O.; MARTINEZ-ALIER, J. (Ed). **Getting down to earth: practical applications of ecological economics**. Washington, D.C.: Island Press, 1996. p. 239-267.

ULBANERE, R.C. **Análise dos balanços energéticos e econômicos relativa à produção de grãos de milho no Estado de São Paulo**. 1988. 127 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1988.

ULBANERE, R.C.; FERREIRA, W.A. Análise do balanço energético para à produção de milho no Estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v.4, n.1, p.35-42, jan 1989.

### 3 SÍNTESE DE EMERGIA EM FLORESTAS COMERCIAIS DE EUCALIPTO

#### Resumo

A sustentabilidade engloba aspectos econômicos, ambientais e sociais, portanto, a sua avaliação requer um escopo de análise sistêmica. No aspecto ambiental, os fluxos de energia são um importante mecanismo no estabelecimento de como o sistema de produção agrega os diferentes materiais e a energia embutida neles na obtenção de um produto ou na energia disponibilizada. As formas de energia apresentam qualidades distintas, no tocante à capacidade em realizar trabalho. A emergência é a energia disponível de um tipo, geralmente solar, necessária para a obtenção de um produto ou serviço, sendo expressa em equivalentes de joule de energia solar (sej). H.T. Odum introduziu o conceito de emergência para contabilizar a qualidade dos fluxos de matéria e energia dentro de sistemas, considerando-se a degradação devido à entropia. Assim, a síntese de emergência contabiliza todos os fatores de produção, dividido em fluxos renováveis, locais não-renováveis e exógenos. Embora tenha sido empregada no estudo de alguns sistemas de produção de biomassa, a emergência nunca fora utilizada em sistemas de cultivo intensivo nem ao nível operacional. Tendo-se em vista a magnitude do cultivo de eucalipto no Estado de São Paulo, a necessidade da busca pela sustentabilidade dos sistemas de produção, a carência de estudos relacionando-se a caracterização operacional com indicadores de sustentabilidade e a ausência de estudos que incluam os recursos naturais, esse estudo teve por objetivo quantificar a demanda de recursos naturais e adquiridos no mercado e avaliar a sustentabilidade de um sistema de produção de biomassa. Avaliou-se as alternativas de material utilizado no controle de acidez do solo, calcário (cenário básico), cinzas e biossólido. Através da análise de sensibilidade, verificou-se a influência dos fatores de produção na demanda total de energia. Os indicadores adotados foram: UEV, que expressa a emergência por energia disponível ou unidade física do produto; EYR, que relaciona a emergência total requerida aos recursos exógenos; EIR, que relaciona os insumos exógenos ao sistema e os endógenos, renováveis e não-renováveis; ELR, que indica o uso de recursos não-renováveis (locais mais exógenos) em relação ao uso de renováveis. A principal fonte de emergência incorporada foi um recurso renovável, evapotranspiração com 60,5% do total, seguido de combustível (10,5%). A maioria dos insumos exógenos é utilizada na colheita (42,8% do total). O uso de calcário resultou no menor UEV (emergência por unidade física) de  $9,02E02 \text{ sej J}^{-1}$ , enquanto com cinzas e biossólido elevou o UEV para  $9,56E02 \text{ sej J}^{-1}$  e  $1,12E03 \text{ sej J}^{-1}$ , respectivamente. Os outros índices adotados foram modificados com tendência similar. Na análise de sensibilidade, dentro de cada cenário proposto, a alteração no uso de devido as modificações operacionais possíveis, abordadas nos cenários propostos, foi diminuta (menos de 2,5%). A síntese emergética permitiu a avaliação tanto dos efeitos das decisões operacionais na eficiência ambiental quanto na comparação global entre sistemas de produção de biomassa florestal. Concluiu-se que esse sistema é eficiente face aos sistemas de outros locais, apesar da alta intensidade operacional.

**Palavras-chave:** Biomassa; Contabilidade ambiental; Teoria de sistemas; Abordagem integrada

## EMERGY SYNTHESIS IN INTENSIVE EUCALYPTUS FORESTS

### Abstract

Sustainability approaches economic, environmental and social aspects so; its evaluation demands a scope of systemic analysis. In the environmental aspect, the energy flows are an important device to establish how the production system aggregates the different materials and their energy content in the obtaining of a product or the available energy. The energy forms present distinct qualities, regarding the ability to perform work. Emergy is the available energy of a kind, generally solar, demanded to obtain a product or service. It is expressed in equivalents of solar joules (sej). H.T. Odum introduced the emergy concept to account the quality of material and energy flows within systems, considering the entropy degradation. Thus, the emergy synthesis accounts all the production factors, allocated in renewable, local non renewable and exogenous flows. Although emergy has been used in studies evaluating some production systems of biomass, it had never been used to study nor an intensive system neither a system in operational level. Considering the magnitude of eucalyptus cultivation in Sao Paulo state, the search for sustainability of the production systems, the lack of studies that include natural resources, this study aimed to quantify the demand of natural and acquired resources and to evaluate the sustainability of a biomass production system. The alternatives to control the soil acidity, lime (basic scenario), ashes and sludge were evaluated. Through the sensitivity analysis, the influence of production factors in the total energy demand was verified. The adopted indicators were: UEV, which expresses the total demanded emergy per available emergy or physical unit of the product; EYR, which relates the total emergy demanded and the exogenous emergy; EIR, which relates the exogenous and endogenous (renewable or not) resources; ELR, which indicates the use of non renewable (local or exogenous) and the renewable resources. For the studied scenario, the main emergy source was a renewable one, evapotranspiration with 60.5%, followed by fuel (10.5%). Most of the exogenous emergy was used in the harvesting (42.8%). The use of lime resulted in the lowest UEV,  $9.02E02 \text{ sej J}^{-1}$ , while with ashes and sludge, the UEV increased to  $9.56E02 \text{ sej J}^{-1}$  and  $1.12E03 \text{ sej J}^{-1}$ , respectively. The other adopted indices followed the same tendency. In the sensitivity analysis, for each proposed scenario, the alteration in the resource use due to the possible operational changes was minute (less than 2.5%). Emergy synthesis allowed the evaluation either of the effect of the operation decisions in the environmental performance or in the global comparison among production systems of forest biomass. One concluded that this system is efficient vis-à-vis the systems studied in other locations, although it presents a high operational intensity.

**Keywords:** Biomass; Environmental accounting; Systems theory; Integrated approach

### 3.1 Introdução

Sustentabilidade é um termo que engloba aspectos sociais, econômicos e ambientais. Para avaliá-la em sistemas silviculturais, técnicas de medição que abordem apenas um de seus aspectos podem não obter o devido êxito ao tentar relacionar algum desses aspectos com os demais. Para o planejamento e avaliação das operações silviculturais, fatores econômicos e não-econômicos devem ser levados em consideração, demandando a visão sistêmica (TELLARINI e CAPORALI, 2000). Estudos abordando o manejo para cenário ótimo econômico e ambiental (DIAZ-BALTEIRO e RODRIGUEZ, 2006) e melhorias nas condições ambientais das florestas manejadas (RANIUSA et al., 2005) têm sido desenvolvidos. Ainda, com os esforços para relacionar economia e ecologia vêm proliferando os conceitos que quantificam a eficiência ecológica. Essa eficiência, de acordo com DeSimone e Popoff (1997), é a obtenção de produtos e serviços que satisfaçam a necessidade humana com preços competitivos diminuindo o impacto ambiental durante o ciclo de vida dos produtos. Em geral, há uma ampla concordância de que a prosperidade econômica em curto prazo, simultaneamente ao desenvolvimento sustentável, representa um objetivo inconsistente (BASTIANONI et al, 2001). De fato, o desenvolvimento tem sido fundamentalmente baseado no uso de recursos não-renováveis devido à influência econômica na tomada de decisão (HALL, 2004), onerando os outros aspectos da sustentabilidade dos sistemas, estrutura social e condições ambientais (BRUNTLAND COMMISSION REPORT, 1987).

A ponderação entre o consumo de recursos naturais e a lucratividade econômica estimula a busca da lucratividade através da melhoria ambiental (SHIREMAN, 1999). Existe um crescente reconhecimento que a viabilidade econômica em longo prazo e a proteção ambiental são compatíveis. Por exemplo, a adoção voluntária às normas internacionais para sustentabilidade, tais como as da série ISO 14000 e a certificação FSC (*Forest Stewardship Council*), surgiu como uma forma de os produtores demonstrarem o comprometimento deles com um desempenho ambiental adequado. À medida que a demanda por práticas ambientalmente corretas cresce, indicadores e sistemas de medição de sustentabilidade se tornaram ferramentas vitais (ESTY e CHERTOW, 1997). A maioria das ferramentas para quantificar a sustentabilidade para a

comparação de processos e alternativas operacionais envolve indicadores baseados em fluxos de energia e material (DESIMONE e POPOFF, 1997).

Energia é normalmente referida como a habilidade de realizar trabalho, baseada no princípio físico que trabalho requer entrada de energia. Ela é medida em unidades de calor (J, cal, BTU) ou movimento molecular, sendo que o grau desse movimento resulta em expansão e é quantificado em graus de temperatura. A energia de calor é uma boa medida da habilidade de elevar a temperatura da água, porém, não é uma boa medida para processos de realização de trabalho mais complexos. Ao mesmo tempo em que toda forma de energia pode ser convertida em calor, não se pode afirmar que as calorias ou joules de uma forma de energia são equivalentes à outra forma na capacidade de realizar trabalho (ODUM, 1996).

Trabalho pode ser conceituado como um processo de transformação de energia onde uma ou mais formas de energia são “processadas” para a obtenção de uma outra forma (Figura 3.1). Os símbolos da linguagem energética, na qual os diagramas são apresentados estão presentes no Anexo F.

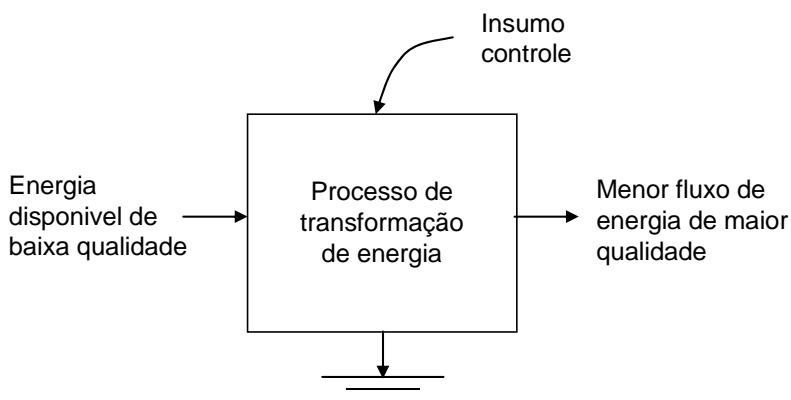


Figura 3.1 – Qualidade de energia em um processo de transformação energética (ODUM, 1996)

H.T. Odum (ODUM, 1988) introduziu o conceito de emergia<sup>14</sup> para contabilizar apropriadamente a qualidade dos fluxos de matéria, energia e informação dentro de sistemas, incluindo a degradação devido às perdas da segunda lei da termodinâmica (ODUM, 1988). A

<sup>14</sup> Emergia escrito com m para denotar a memória da energia.

energia contabiliza o serviço ambiental<sup>15</sup> que suporta diretamente o processo na convergência desses produtos e serviços através da cadeia de transformações de energia e material em espaço e tempo (ODUM, 1996; BROWN e ULGIATI, 2004). Assim, a avaliação de todos os fluxos que entram e saem do sistema (processo denominado de síntese emergética) possibilita que se avalie a demanda de recursos do sistema como um todo, para um determinado esquema de produção, incluindo insumos direta ou indiretamente utilizados. Uma revisão introdutória sobre a metodologia de síntese de energia está presente no Anexo G.

Por definição, energia é a quantidade de energia disponível (exergia), de um tipo (geralmente solar), que é direta ou indiretamente demandada para propiciar um dado fluxo ou estoque de energia ou material. Por exemplo, a matéria orgânica no solo florestal representa a convergência da energia solar direta e indireta, condições climáticas (precipitação e vento), direcionando os processos da floresta por muitos anos o que resulta em camada sobre camada de detritos que lentamente são decompostos em matéria orgânica. A unidade da energia é o emjoule solar (abreviado como sej) para se diferenciar dos joules de energia (J). Quando a energia demandada para produzir um produto ou serviço é expressa como uma razão à energia disponível (exergia) no produto, essa razão resultante é o valor unitário de energia (solar) – abreviado UEV (*unit energy value*) e expressos em emjoules solares por unidade de fluxo (sej unidade<sup>-1</sup>). A razão de energia por unidade de energia (sej J<sup>-1</sup>) é ainda chamada de transformidade e a energia por massa ou volume (sej g<sup>-1</sup>, sej m<sup>-3</sup>) é chamada de energia específica (ODUM, 1996). Para fins de simplificação, no presente estudo, o termo UEV será adotado para expressar a relação da energia demandada pela exergia, massa ou volume do produto em questão.

A qualidade da energia é relacionada com concentração, flexibilidade, facilidade de transporte e capacidade de conversão. Assim, o conceito de qualidade requer um novo conceito de energia que reconheça que todas as formas de energia não têm a mesma capacidade de realizar trabalho (ODUM, 1996).

A síntese de energia atende a esses requisitos como um meio quantitativo de medir qualidade uma vez que ela representa a energia requerida direta e indiretamente para obter um produto ou serviço, porém expressa em uma mesma forma de energia, geralmente energia solar, por ser a

---

<sup>15</sup> Serviço ambiental se refere ao suporte direto (insolação, evapotranspiração potencial, pluviosidade, fertilidade do solo) e indireto (dissipação de poluentes, capacidade de armazenamento de água no solo) que o ambiente propicia ao sistema de produção analisado.

mais difusa e de menor UEV. O valor de energia unitária da energia solar é, conceitualmente, equivalente a 1 sej  $J^{-1}$ .

Uma vez que as atividades econômicas são moldadas não somente por regras econômicas, mas também por restrições ambientais, o uso da energia é atrativo porque relaciona os sistemas econômico e ambiental, compensando objetivamente a inaptidão do dinheiro em atribuir valor para insumos não regulados pelo mercado. A metodologia de energia é cientificamente adequada e compartilha dos rigores da termodinâmica, além de propiciar uma base comum para comparar o uso de recursos e uma visão holística à consciência ambiental na tomada de decisão. Assim, a síntese de energia pode quantificar a contribuição do capital natural para sustentar a atividade econômica (HAU e BAKSHI, 2004).

A energia está de acordo com primeira e segunda leis da termodinâmica. A quantidade de energia é mantida durante todas as transformações do processo (Figura 3.2) enquanto que a UEV aumenta ao longo da cadeia. Por exemplo, a energia disponível no consumidor terciário é 1 J e ele, consumidor, demandou 1 milhão de joules de energia solar. Uma vez que 1 J de energia solar equivale a 1 sej, sua UEV é  $1E6$  sej  $J^{-1}$ . Os drenos de energia (*heat sink*) representam a energia perdida devido à entropia durante as transformações uma vez que cada transformação degrada energia (ODUM, 1996).

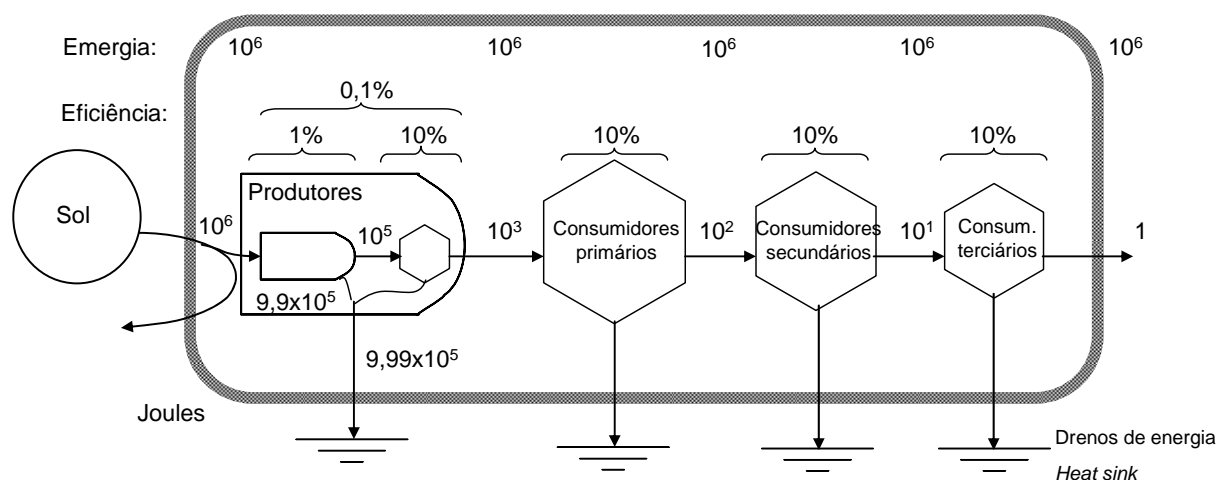


Figura 3.2 – Relação entre energia e emergia ao longo de uma cadeia produtiva



O diagrama sistêmico (Figura 3.3) mostra as contribuições ambientais não-renováveis (N), os insumos ambientais renováveis (R) e os insumos, produtos e serviços, adquiridos no mercado (F). Alguns índices que são utilizados para avaliar o desempenho geral de um processo, de acordo com Odum (1996) são mostrados na Figura 3.3.

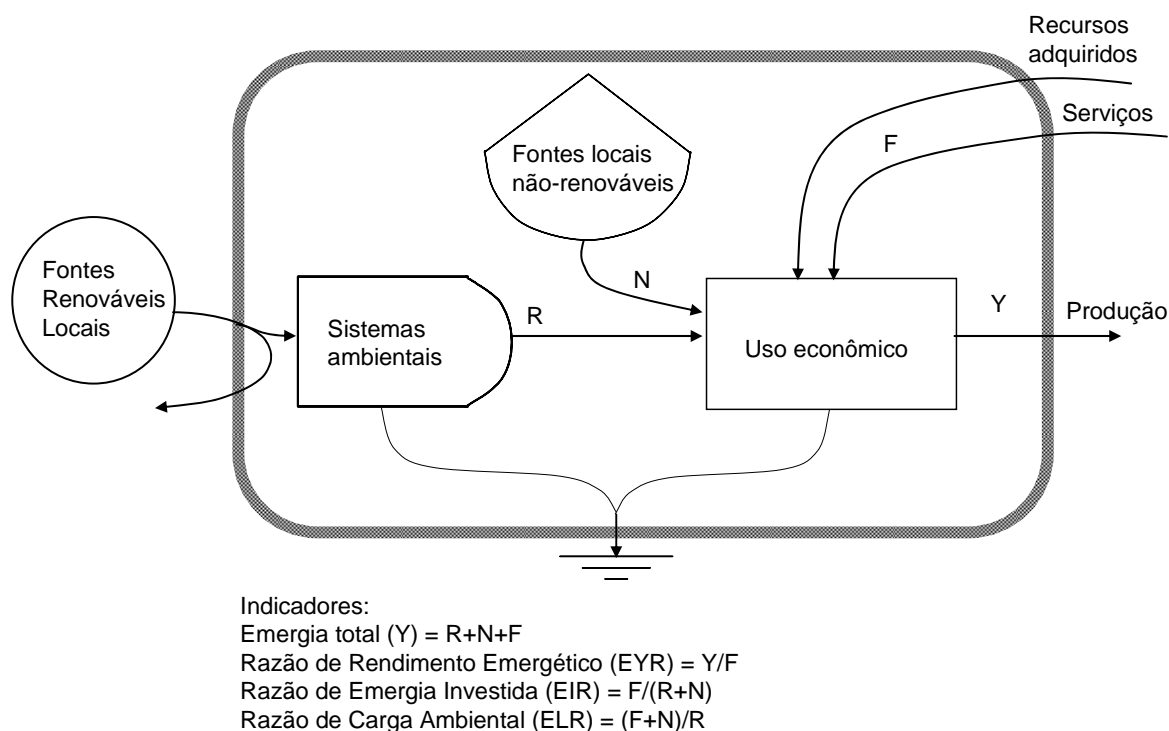


Figura 3.3 – Diagrama sistêmico agregando os fluxos de energia e os índices de energia resultantes (adaptado de BROWN e ULGIATI 1997)

O UEV de um produto é uma medida termodinamicamente explícita de eficiência ambiental, uma vez que relaciona um dado produto ou serviço com o serviço ambiental requerido para a sua produção. Assim, ao se comparar processos distintos de produção de um mesmo produto, como biomassa para celulose, a alternativa com menor UEV é a opção mais sustentável.

Ao estudar a energia requerida por opções de reflorestamento em Porto Rico, Odum et al. (2000) avaliaram a estrutura acumulada de áreas florestadas usando o total de matéria orgânica, sobre e sob o solo, como medida do capital natural. Seis alternativas foram analisadas em função do tempo para calcular o comparativo de eficiência de reflorestamento. Todas as opções geraram benefício público líquido (relação benefício/custo variou de 2,6:1 a 24,7:1) e as UEVs variaram

de  $3,2E4$  a  $10,8 E4$   $\text{sej J}^{-1}$ . Os autores concluíram que as melhores alternativas dependem dos objetivos, condições locais e disponibilidade de recursos, demonstrando que esforços para acelerar a sucessão florestal através do manejo são justificados. Diversos processos produtivos de biomassa (madeira) em diferentes partes do mundo, com ciclos variando de 4 a 140 anos, foram comparados por Doherty (1995). Em seu estudo, as UEVs para produção de biomassa variaram de  $1,13E4$  a  $5,56 E4$   $\text{sej J}^{-1}$ , entre diferentes espécies. Especificamente para eucalipto, o autor determinou a energia demandada na Flórida, EUA, em um plantio de *Eucalyptus spp.* + *Melaleuca spp.*, obtendo uma UEV de  $2,71 E4$   $\text{sej J}^{-1}$  para madeira colhida.

Existem diversos estudos comparando manejos de diferentes métodos de cultivo, como período de rotação, alternativas de reflorestamento e manejo de uso múltiplo (DOHERTY, 1995; ODUM et al., 2000; TILLEY e SWANK, 2003). Porém, os processos operacionais de manejo das florestas estudadas por esses autores são relativamente padronizados. Portanto, existe uma grande necessidade de estudos em plantios comerciais que comparem as demandas de fluxos de energia e material de técnicas operacionais. Esses estudos devem objetivar a sustentabilidade dentro dos limites operacionais das alternativas viáveis. Estudos sobre a eficiência no uso de recursos e análises de sensibilidade são comumente empregadas em avaliações de benefício e custo econômicos, mas raramente para se comparar a sustentabilidade de processos.

Tendo em vista a magnitude do cultivo de eucalipto (*Eucalyptus spp.*) no Estado de São Paulo, a necessidade da busca pela sustentabilidade dos sistemas de produção, a carência de estudos relacionando-se a caracterização operacional com indicadores de sustentabilidade e a ausência de estudos que incluam os recursos naturais, o presente estudo teve por objetivo quantificar a demanda de recursos naturais e adquiridos no mercado e avaliar a sustentabilidade de um sistema de produção de biomassa para papel e celulose.

## 3.2 Desenvolvimento

Nesse item são apresentadas as etapas referentes ao desenvolvimento do presente estudo: a aplicação metodologia da síntese de emergia para os sistemas de produção de mudas e biomassa de eucalipto; a obtenção dos indicadores para os sistemas avaliados; a comparação das diferentes alternativas de manejo de controle de acidez do solo; a análise de sensibilidade dos cenários propostos; a comparação desse sistema de produção de biomassa com outros localizados em diversas regiões do mundo.

### 3.2.1 Material e Métodos

Avaliou-se um sistema de produção intensivo de eucalipto, através da metodologia da síntese de emergia. Para tal, foi necessário se determinar o fluxo de material e demanda de insumos por área no sistema de produção avaliado. Assim, houve um levantamento dos sistemas produtivos junto à Companhia Suzano Papel e Celulose em 2004 e 2005. Os sistemas de rotação foram avaliados em áreas já cultivadas uma vez que a implantação em novas áreas é inexpressiva devido à disponibilidade das mesmas ser limitantes.

#### Síntese de emergia

Para se calcular a emergia requerida na produção de biomassa, calculou-se primeiro a do sistema de produção de mudas e posteriormente a do sistema de eucalipto. Para cada sistema, seguiu-se o protocolo padrão de contabilidade ambiental (DOHERTY et al., 2002), que se inicia com o desenvolvimento do diagrama sistêmico de emergia (ODUM, 1996), resumindo a base de recursos para a operação dos sistemas. Esse diagrama (Figura 3.3, página 73) é usado para identificar os insumos-chave de cada sistema e a partir dele, compila-se a lista de insumos necessários direta e indiretamente na produção. Tais recursos são alocados como renovável (R), local não-renovável (N) e adquirido no mercado (F). Os recursos renováveis (R) são: energia solar, precipitação, movimentação de massas de ar, evapotranspiração. Os recursos locais não renováveis (N) são solo erodido, fósforo presente no solo, água em lençóis freáticos utilizada em taxa superior à recarga. Os recursos adquiridos no mercado (F) são todos aqueles que foram

obtidos externamente aos limites do sistema, existindo o intercâmbio com a moeda para o emprego no sistema de produção.

Esses insumos quando listados, formam a base de uma tabela de contabilidade ambiental, com o fluxo físico e unidade relatados. Para se comparar os diferentes tipos de recursos, ajustam-se as unidades físicas (g, J) pelas UEVs (sej unidade<sup>-1</sup>) oriundos de referências bibliográficas para se estimar a emergia (sej). Todas as tabelas incluem as fontes dos dados dos fluxos biofísicos (por exemplo, massa de fertilizante utilizado por hectare anualmente) e das UEVs atribuídas a cada fluxo (por exemplo, sej g<sup>-1</sup> para o fertilizante). Em todas as tabelas as UEVs foram corrigidas para a nova base emergética global<sup>16</sup> (ODUM, 2000). Os cálculos referentes à base emergética da biosfera terrestre são apresentados no Anexo H.

Os produtos-chave de uma síntese de emergia incluem a determinação da UEV para o produto obtido e um conjunto de indicadores sistêmicos. Esses indicadores são utilizados em análises comparativas entre sistemas concorrentes baseados em como a emergia é fracionada dentro deles. A relação entre os fluxos determina as razões de: rendimento emergético (EYR); carga ambiental (ELR); emergia investida (EIR).

A razão de rendimento emergético (EYR) é aquela que expressa a emergia total contida no produto (Y<sup>17</sup>) em relação aos recursos adquiridos no mercado (F), recursos esses externos aos limites do sistema (Equação 3.1). É uma medida da agregação de recursos em um produto relativo à contribuição da economia, através dos recursos obtidos no mercado. Além disso, é um indicador de retorno de energia sobre investimento (EROI – HALL et al., 2003). O valor obtido indica a contribuição da emergia proveniente do sistema de produção (R, recursos renováveis e N, recursos locais não-renováveis) para a economia, que consome o produto ou serviço. Quanto maior o valor do índice, melhor é o sistema de produção.

$$EYR = \frac{Y}{F} \quad (3.1)$$

<sup>16</sup> A nova base emergética global estabeleceu que o planeta recebe anualmente 15,83E24 sej. A base antiga era de 9,42E24 sej, então para corrigir as UEVs estabelecidas na base antiga utiliza-se o fator de 1,68.

<sup>17</sup> Y é a soma de R, N e F.

Em que:

EYR = razão de rendimento emergético, adimensional;

Y = energia total contida em um produto ou serviço, é a soma de R (fluxo de energia nos recursos renováveis), N (fluxo de energia dos recursos locais não-renováveis) e F, em sej por tempo;

F = fluxo de energia dos recursos adquiridos no mercado, em sej por tempo.

A razão de carga ambiental (ELR) indica o uso de recursos locais não-renováveis (N) somados aos recursos adquiridos (F) em relação ao uso de recursos renováveis (R), conforme a Equação 3.2. É um indicador do impacto esperado no ecossistema devido à atividade produtiva analisada (BROWN e ULGIATI, 1997), quantificando a renovabilidade do processo, presente nos fluxos envolvidos. Quanto menor o valor desse índice mais ambientalmente sustentável será o sistema de produção.

$$ELR = \frac{(F+N)}{R} \quad (3.2)$$

Em que:

ELR = razão de carga ambiental, adimensional;

F = fluxo de energia dos recursos adquiridos no mercado, em sej por tempo;

N = fluxo de energia dos recursos locais não-renováveis, em sej por tempo;

R = fluxo de energia nos recursos renováveis, em sej por tempo.

A energia investida (EIR) expressa a razão entre os insumos adquiridos externamente ao sistema (F) e os insumos endógenos ao sistema, ambos renováveis e não-renováveis (R+N), conforme a Equação 3.3. É uma medida que estabelece o grau em que o processo está ajustado à economia regional ou a viabilidade de ser uma opção adequada dentre as alternativas. Esse indicador mede a auto-suficiência do sistema no provimento de recursos necessários ao processo produtivo e indica também a eficiência com que os recursos exógenos investidos são utilizados. Esse índice tem grande valia quando é analisado em um contexto regional, por exemplo, na comparação de

valores de EIR para o estado ou país. Quanto menor o valor desse índice mais ambientalmente sustentável será o sistema de produção.

$$EIR = \frac{F}{(N + R)} \quad (3.3)$$

Em que:

EIR = razão de energia investida, adimensional.

### Análise do sistema de produção

Avaliou-se o sistema de produção de eucalipto, cujo cenário básico está descrito no item 2.2.7 do capítulo 2. Empregou-se a síntese de energia nesse cenário, que faz uso de calcário no controle de acidez do solo, e também na avaliação das alternativas à calagem: cinzas e biossólido. A partir do cenário básico quantificou-se a contribuição do ambiente, de cada operação mecanizada e dos fatores de produção (mão-de-obra, combustível, insumos agrícolas e depreciação energética do maquinário) na demanda total de energia. Determinou-se o efeito de cenários propostos (item 2.2.7). As etapas seguidas para se determinar a síntese de energia do sistema de produção de eucalipto avaliado e seus indicadores estão apresentadas na Figura 3.4.

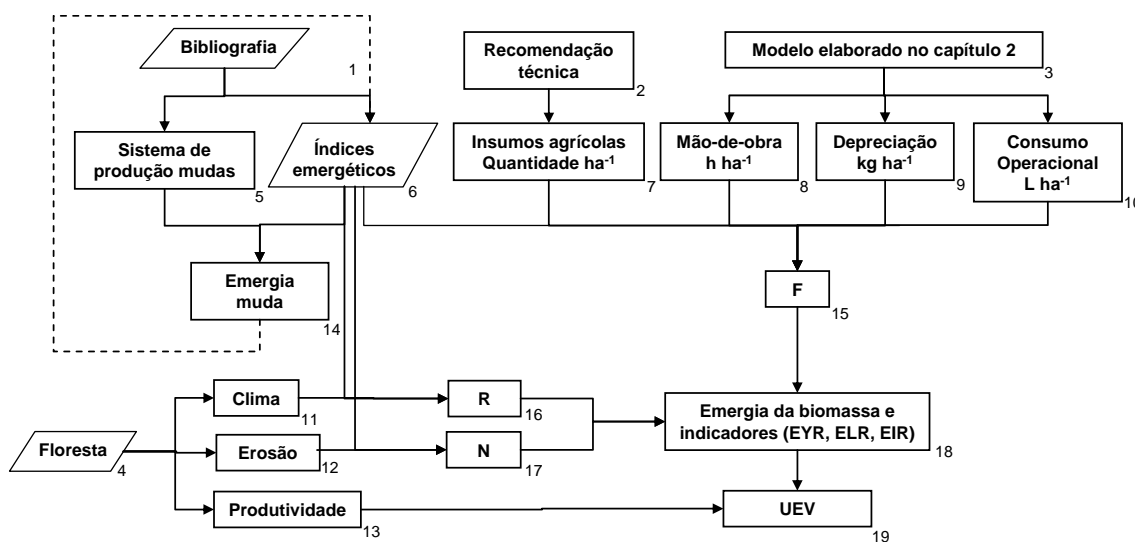


Figura 3.4 – Fluxograma da determinação da síntese de energia para o sistema de produção de eucalipto

A primeira etapa foi a determinação da energia contida nas mudas de eucalipto. Para tanto, buscou-se dados sobre sistemas de produção de mudas na bibliografia (1)<sup>18</sup>. Através desses dados, listou-se os insumos e suas quantidades demandadas para a produção de mudas (5), contabilizando-se o fluxo de material necessário. O produto desse fluxo e dos índices energéticos (6), UEVs, permitiram a determinação da energia contida por muda (14). Assim, a UEV da muda alimentou a fonte de dados sobre os índices energéticos (6) que foram utilizados na determinação da energia da biomassa de eucalipto. Essa metodologia foi utilizada devido à falta de índices que considerassem o sistema de produção ao invés do preço, que multiplicado pela razão energia:moeda (EMR) do país, estimava o conteúdo de energia desse insumo.

No tocante ao sistema de produção de eucalipto, seu fluxo de material se baseou nas recomendações técnicas (2) e no modelo elaborado (3) e descrito no capítulo 2. As recomendações estabelecem a demanda de insumos agrícolas (7), que são diretamente aplicados na floresta. O modelo elaborado fornece dados sobre os fatores de produção indiretamente empregados, mão-de-obra (8), depreciação energética de maquinário (9) e o consumo de combustível operacional (10). O produto dos diferentes fatores de produção compreendidos nesse fluxo de material e de seus respectivos índices energéticos (6) determinam o fluxo de recursos adquiridos no mercado (15), chamado de F, descrito na Figura 3.3 (página 73).

Para a determinação dos fluxos de recursos naturais renováveis – R (16) e dos recursos locais não-renováveis – N (17) foram necessário os dados sobre a floresta (4). Foram obtidos os dados, junto às empresas, referentes ao clima (11), erosão de solo (12) e produtividade (13). Os dados climáticos (11) foram utilizados para se calcular a evapotranspiração, que multiplicada pela UEV correspondente (6), representou o fluxo de recursos renováveis – R (16). O produto da erosão de solo, quantificada pelo seu teor de matéria orgânica e do índice energético (6) resultou no fluxo de recursos locais não-renováveis – N (17).

A soma total dos fluxos F (15), R (16) e N (17) determinam a energia contida na biomassa colhida (18). As relações entre esses fluxos determinam os indicadores (18): rendimento energético (EYR); carga ambiental (ELR); energia investida (EIR). A razão da energia da

---

<sup>18</sup> Os números entre parênteses se referem à Figura 3.4.

biomassa com a produtividade, expressa em energia disponível (J) ou volume ( $\text{m}^3$ ), estabelece a UEV da biomassa de eucalipto (19).

#### Síntese de energia para a produção de mudas

A síntese de energia para a produção de mudas foi realizada utilizando-se dados de Stape e Balloni (1989), Lopes (2004) e Oliveira Junior (2005) para se refinar a estimativa de energia incorporada nesse fluxo. Doherty (1995) aplicou o preço das mudas multiplicado pela EMR (razão moeda energia em  $\text{sej US\$}^{-1}$ ) para considerar esse fluxo. Esse procedimento atribui um valor aproximado, por isso um estudo mais detalhado do processo de produção de mudas foi necessário. Na presente avaliação, contabilizou-se o fluxo de material e energia do processo produtivo (mão-de-obra, combustíveis, equipamentos). Para se contabilizar o fluxo das sementes utilizou-se o preço. Nesse sistema de produção, as mudas foram produzidas por clonagem, método para o qual nenhum UEV específico havia sido desenvolvido. Assim, assumiu-se que a semente contém energia proporcional à média da economia do país (EMR). A UEV de mudas consideradas nessa análise foi então utilizada como um insumo no sistema de produção de eucalipto.

#### Síntese de energia na produção de eucalipto

A biomassa desse sistema é colhida para produção de celulose e papel, porém determinou-se os valores unitários de energia (UEVs) para volume (sej  $\text{m}^{-3}$ ) e energia disponível (sej  $\text{J}^{-1}$ ) para refletir também o potencial uso na disponibilização de energia.

### 3.2.2 Resultados e Discussão

Nesse item são mostrados os resultados obtidos pela síntese de energia para a produção de eucalipto e os indicadores utilizados na avaliação do sistema. Determinou-se também a energia contida nas mudas através do material e serviços aplicados, ao invés do preço de da relação energia:moeda do país. O índice obtido para as mudas entrou no computo da síntese da biomassa de eucalipto, cujos fluxos de material demandados foram listados na Tabela 2.2, no



capítulo 2. Esse estudo efetuou a contabilidade ambiental detalhada de um sistema de produção intensivo de madeira para celulose.

### Síntese de energia para mudas

A determinação da energia contida nas mudas inicia-se pela elaboração do diagrama sistêmico de seu processo produtivo (Figura 3.5).

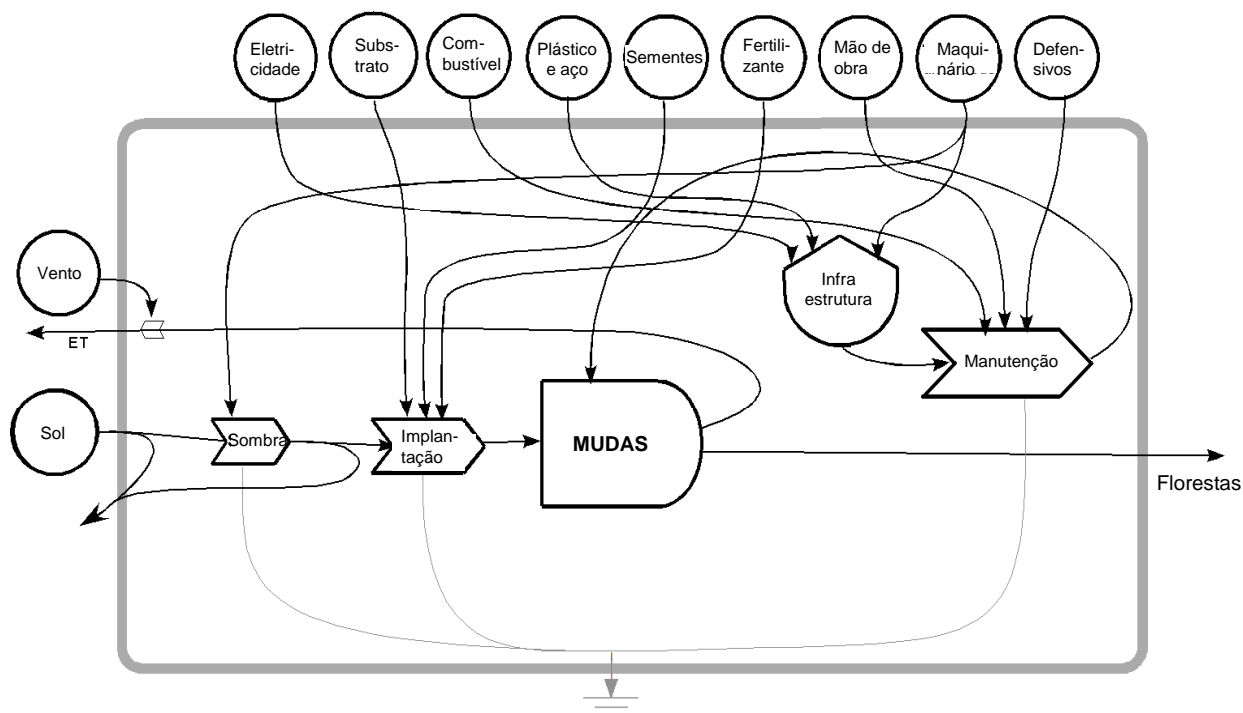


Figura 3.5 – Diagrama sistêmico para o sistema de produção de mudas de eucalipto

O diagrama apresenta os recursos renováveis que são aplicados ao sistema de produção, situados do lado esquerdo do retângulo, que representa os limites do sistema. O vento atua na evapotranspiração das plantas. O sol, cuja emissão de luz não atravessa a atmosfera em sua totalidade, tem sua participação regulada pelo uso de sombrite (telas). Tanto a luz solar quanto os insumos adquiridos no mercado, situados na parte superior do retângulo, participam das atividades de produção das mudas. O substrato, as sementes e os fertilizantes são fluxos

componentes da obtenção. A eletricidade, o plástico e o maquinário compõem o estoque chamado de infra-estrutura, o qual é depreciado na execução de um conjunto de operações, chamadas de manutenção. O combustível, a mão-de-obra e os defensivos atuam na manutenção, porém são representados por fluxos. As interações desses insumos envolvidos na manutenção atuam sobre as mudas e essas têm como destino a implantação das florestas.

O sistema de produção de mudas requer luz solar, água e sementes, ou outra estrutura de propagação, que são combinados com os fluxos de recursos adquiridos para aumentar a sobrevivência e eficiência no uso de espaço. Esses fluxos incluem os fluxos de eletricidade, combustível, plástico, defensivos, mão-de-obra, depreciação emergética de maquinário e das estruturas dos viveiros. Os fluxos são quantificados na Tabela Padrão de síntese de energia (Tabela 3.1), com notas detalhadas sobre a fonte dos fluxos de material e as UEVs. Devido à pequena quantidade aplicada para cada muda, todas as determinações foram feitas com base em um milhão de mudas. A produção anual média do viveiro foi 1,4 milhão de mudas (LOPES, 2004). O período de rotação entre a semeadura e a comercialização de mudas foi de 90 dias e portanto, as medidas anualizadas dos fluxos não foram determinadas.

De acordo com a Tabela 3.1, os sete principais insumos no sistema de produção de mudas (Figura 3.6) são responsáveis por 97,7% do fluxo total de energia: plástico; mão-de-obra; sementes; substrato; depreciação emergética de mesas de aço (usadas na germinação de mudas); sombrite; osmocote (fertilizante de lenta disponibilização). Embora o sistema de produção de eucalipto avaliado faça uso de mudas clonais a partir de propagação vegetativa, dados mais detalhados sobre o sistema de produção por semeadura foram encontrados e utilizados (STAPE e BALLONI, 1989; LOPES, 2004; OLIVEIRA JUNIOR, 2005). A energia contida nas sementes foi considerada proporcional à relação média entre energia e moeda – o dinheiro gasto com sementes adquire energia a uma certa taxa (EMR), a qual é de  $1,20E13$  sej  $US\$^{-1}$ , para o Brasil (SWEENEY et al., 2006). As UEVs foram atualizadas para a nova base de energia (ODUM et al., 2000). Os fluxos de insumos ambientais (luz e vento) são pequenos quando comparados com os fluxos adquiridos, em concordância com as operações intensas do viveiro. O resultado da UEV para muda ( $1,71E11$  sej muda<sup>-1</sup>) foi utilizado na avaliação do sistema de produção de eucalipto.

Tabela 3.1 – Síntese de energia para mudas de eucalipto (ciclo de 90 dias)

| Nota                           | Insumos   | Unidade | Quantidade      | UEV                       |  | Fluxo de energia       |                |
|--------------------------------|---|---------|-----------------|---------------------------|--|------------------------|----------------|
|                                |   |         |                 | sej unidade <sup>-1</sup> |  | sej                    | E8 sej         |
| <i>Recursos renováveis (R)</i> |   |         |                 |                           |  |                        |                |
| 1                              | Insolação   | J       | 2,97E09         | 1                         |  | 2,97E09                | 29,7           |
| 2                              | Evapotranspiração   | J       | 1,84E03         | 30576                     |  | 5,64E07                | 0,6            |
|                                |   |         |                 |                           |  | <i>Subtotal (R)</i>    | <i>30,9</i>    |
| <i>Recursos adquiridos (F)</i> |   |         |                 |                           |  |                        |                |
| 3                              | Sementes  | US\$    | 2,27            | 1,20E13                   |  | 2,72E13                | 272400,0       |
| 4                              | Fertilizante (Osmocote)   | g       | 2200            | 2,98E09                   |  | 6,55E12                | 65463,9        |
| 4                              | Fertilizante (Superfosfato)                                     | g       | 500             | 2,35E09                   |  | 1,18E12                | 11761,2        |
| 4                              | Fertilizante ((NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | g       | 500             | 1,55E09                   |  | 7,73E11                | 7728,0         |
| 4                              | Fertilizante (KCl)  | g       | 250             | 1,53E09                   |  | 3,82E11                | 3821,4         |
| 5                              | Defensivo (Captan)  | g       | 4,1             | 2,49E10                   |  | 1,03E11                | 1029,5         |
| 5                              | Defensivo (Bentale)   | g       | 0,3             | 2,49E10                   |  | 7,01E09                | 70,1           |
| 5                              | Defensivo (Dithane)   | g       | 1,2             | 2,49E10                   |  | 3,00E10                | 300,3          |
| 5                              | Defensivo (Decis)   | g       | 0,2             | 2,49E10                   |  | 4,18E09                | 41,8           |
| 6                              | Combustível   | l       | 0,3             | 3,85E12                   |  | 1,16E12                | 11554,9        |
| 7                              | Aço (mesas)   | g       | 3200            | 4,13E09                   |  | 1,32E13                | 132160,0       |
| 7                              | Sombrite  | g       | 1400            | 5,85E09                   |  | 8,19E12                | 81900,0        |
| 7                              | Plástico  | g       | 8300            | 5,85E09                   |  | 4,86E13                | 485550,0       |
| 8                              | Eletricidade  | J       | 2,52E05         | 1,74E05                   |  | 4,47E10                | 446,6          |
| 9                              | Substrato   | g       | 21000           | 6,97E08                   |  | 1,46E13                | 146412,0       |
| 10                             | Mão de obra   | J       | 1,07E07         | 4,50E06                   |  | 4,85E13                | 485489,7       |
| 11                             | Trator + carreta  | g       | 7,7             | 6,70E09                   |  | 5,14E10                | 513,7          |
| 11                             | Caminhão  | g       | 7               | 6,70E09                   |  | 4,69E10                | 469,0          |
| 11                             | Sistema de irrigação  | g       | 40,1            | 6,70E09                   |  | 2,68E11                | 2684,5         |
|                                |   |         |                 |                           |  | <i>Subtotal(F)</i>     | <i>1709796</i> |
| <i>Produto</i>                 |   |         | Para 1000 mudas |                           |  | sej                    | 1,71E14 sej    |
|                                |   |         |                 |                           |  | sej muda <sup>-1</sup> | 1,71E11 sej    |
| EYR                            |   | 1,00    |                 |                           |  |                        |                |
| EIR                            |   | 56452   |                 |                           |  |                        |                |
| ELR                            |   | 56452   |                 |                           |  |                        |                |

Nota:

- Insolação =  $(808,05 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}) * (4,18 \text{ J cal}^{-1}) * (1\text{E}4 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}) * (90 \text{ dias}) * (0,98 \text{ m}^2 \text{ 1000 mudas}^{-1}) = (2,97\text{E}9 \text{ J})$ . UEV para energia solar = 1 sej J<sup>-1</sup> (ODUM, 1996).
- UEV para Evapotranspiração (ET) = 3,06E4 sej J<sup>-1</sup>, Brown e Bardi (2001) citando Doherty (1995).  $ET = (4 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}) * (0,012 \text{ m}^2 \text{ muda}^{-1}) * (7776000 \text{ s } 90 \text{ dia}^{-1}) * (1 \text{ kg } 1\text{E}-6 \text{ mg}^{-1}) * (1000 \text{ muda}) * (4,94\text{E}3 \text{ J kg}^{-1}) = 1,84\text{E}3 \text{ J}$ .
- Energia de sementes determinada pela EMR =  $(\text{US\$ } 0,227 \text{ g}^{-1}) * (10 \text{ g } 1000^{-1} \text{ muda}^{-1}) = (2,27 \text{ US\$ } \text{ muda}^{-1})$ . EMR para o Brasil é 1,20E13 sej US\$<sup>-1</sup>, Sweeney et al. (2006)
- UEV para fertilizantes (ODUM, 1996): K<sub>2</sub>O = 2,92E9 sej g<sup>-1</sup> K, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 2,99E10 sej g<sup>-1</sup> P, N = 7,7E9 sej g<sup>-1</sup> N. KCl tem 63% K<sub>2</sub>O, que apresenta 83% K (KCl = 52% K), Superfosfato tem 18% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que apresenta 43,7% P (superfosfato = 7,9% P), sulfato de amônio (20%N) e osmocote (10-15-10) que apresenta 10% N, 15% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (43,7% P) e 10% K<sub>2</sub>O (83% K).
- Baseado na UEV de defensivos 2,49E10 sej g<sup>-1</sup>, Brandt-Williams (2001), citando Brown e Arding (1991).
- UEV para combustível =  $(1,32\text{E}8 \text{ J galão}^{-1}) * (1 \text{ galão } 3,8 \text{ L}^{-1}) * (1,1\text{E}5 \text{ sej J}^{-1}) = 3,85\text{E}7 \text{ sej L}^{-1}$  (ODUM, 1996).
- UEV para aço = 4,13E9 sej g<sup>-1</sup>, UEV para plástico 5,85E9 sej g<sup>-1</sup>, Brown e Buranakarn (2003).
- Eletricidade demandada =  $(2,2 \text{ kW}) * (2 \text{ h } \text{ dia}^{-1}) * (227 \text{ dias } \text{ ano}^{-1}) (\text{ano } 1,4\text{E}7 \text{ mudas}^{-1}) * (1000 \text{ mudas}) * (3,6\text{E}6 \text{ J kWh}^{-1}) = 0,07 \text{ kWh}$  para 1000 mudas. UEV para eletricidade = 1,74E5 sej J<sup>-1</sup> (BROWN e BURANAKAN, 2003).

9. Substrato é composto de 35% de vermiculita, 35% de casca de pinus e 30% de fibra de coco, UEVs são: para vermiculita  $1,68E09 \text{ sej g}^{-1}$ , casca de pinus =  $1,68E08 \text{ sej g}^{-1}$  e fibra de coco  $1,68E08 \text{ sej g}^{-1}$  (ODUM, 1996).
10. UEV para mão de obra  $4,5E6 \text{ sej J}^{-1}$ , Brandt-Williams (2001). Energia por hora de mão de obra humana =  $(8,2 \text{ h}) * (2500 \text{ kcal dia}^{-1}) * (\text{dia } 8 \text{ h}^{-1}) * (4186 \text{ J kcal}^{-1}) * (4,5E6 \text{ sej J}^{-1}) = 5,89E12 \text{ sej h}^{-1}$ .
11. UEV para depreciação energética de maquinário =  $(6,7E9 \text{ sej g}^{-1})$  Brown e Bardi (2001) citando Doherty (1995).  $(6,7E9 \text{ sej g}^{-1}) * (1000 \text{ g kg}^{-1}) = 6,7E12 \text{ sej kg}^{-1}$ .

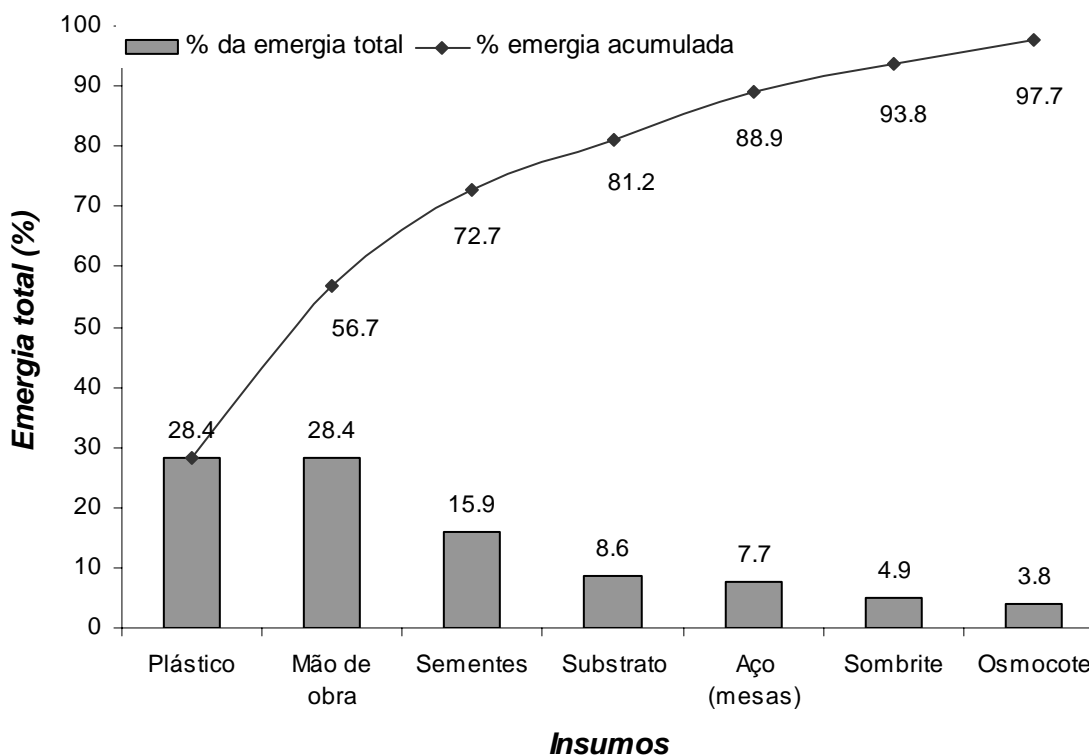


Figura 3.6 – Demanda de energia no sistema de produção de mudas

Em estudos prévios, a estimativa de fluxo de energia em mudas foi feita usando o valor pago por elas e a razão de moeda e energia (EMR) regional. Esse estudo considerou com mais detalhes a energia requerida para a produção, eliminando a necessidade da abordagem simplificada. Atentou-se para a demanda real de recursos para a produção de mudas, o que não apenas revelou a importância da mão-de-obra no processo, mas também ressaltou o grau em que os recursos adquiridos (F) superam os insumos naturais (R). O sistema apresentou um R equivalente a  $3,03E9 \text{ sej}$ , valor irrelevante face aos  $1,71E14$  contido em F (EIR superior a 1000).

Ao se avaliar a eficiência ambiental da produção de mudas, observou-se que o uso de materiais alternativos ao plástico e ao aço, 28,4% e 8,0% do total de energia, respectivamente, pode

reduzir a energia requerida para a produção. A energia embutida na mão-de-obra (28,4% do total) também é alta, mas os esforços em reduzir esse insumo são provavelmente menos desejáveis pelos impactos potenciais às condições de trabalho. Além disso, a otimização econômica do processo produtivo possivelmente já estabeleceu uma condição de minimizar o uso da mão-de-obra. Uma redução deve demandar o aumento de outros insumos físicos como por exemplo em infra-estrutura ou automação.

A energia requerida por uma única muda de eucalipto foi de 1,71E11 sej. Em comparação, Doherty (1995) relata um valor de 2,40E12 sej por muda para produção de eucalipto na Flórida, porém essa determinação foi feita exclusivamente com base no valor pago e na EMR. A grande diferença entre os valores, aproximadamente 14 vezes mais, indica a necessidade de se avaliar detalhadamente a demanda de recursos.

### Síntese de energia na produção de eucalipto

A Figura 3.7 resume a base de recursos utilizados na produção de eucalipto, incluindo os insumos naturais renováveis (necessários à evapotranspiração), estoques naturais (perda de solo), estoques de recursos adquiridos (maquinário) e fluxos de recursos adquiridos no mercado (combustível, insumos agrícolas, depreciação emergética de maquinário e mão-de-obra).

O diagrama sistêmico mostra os recursos renováveis que são aplicados ao sistema de produção, situados do lado esquerdo do retângulo que representa os limites do sistema. O vento atua na evapotranspiração das plantas e a evapotranspiração é resultante na luz solar incidente, da movimentação das massas de ar e das chuvas. As chuvas incidiram sobre o solo (estoque de recurso local) para então a água, dela oriunda, ser disponibilizada à floresta (unidade produtora). O estoque de solo sofre perdas para fora do sistema através de processos erosivos. Os insumos adquiridos no mercado, situados na parte superior do retângulo, são aplicados nas atividades de implantação e condução da floresta através de seus fluxos, com exceção do maquinário. Ao adquirir uma máquina ela passa a fazer parte do estoque da empresa (infra-estrutura) sendo depreciada na execução das atividades de implantação, condução e colheita. Alguns insumos, através dessas atividades, são aplicados diretamente na floresta (mudas), outros são aplicados no solo para que o efeito ocorra na floresta (fertilizantes, corretivos, defensivos). A colheita, além do produto que vai para o mercado, gera resíduos, folhas, casca e galhos, que são incorporados

ao solo. Ao ter seu produto negociado no mercado, o sistema recebe entrada de dinheiro, utilizado para pagar os insumos adquiridos (F). Assim, os recursos renováveis (R) e locais não-renováveis (N) não são remunerados pelas atividades econômicas.

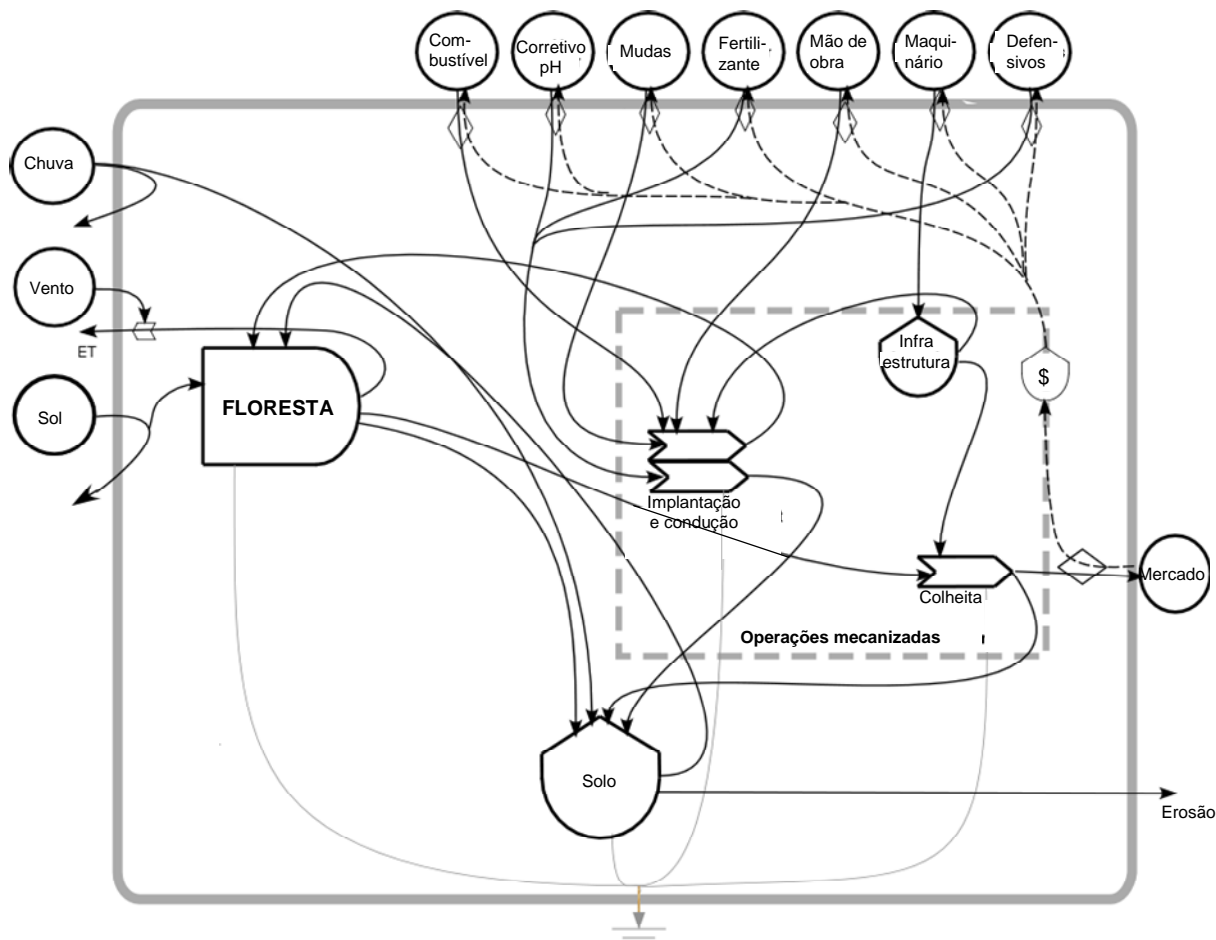


Figura 3.7 – Diagrama sistêmico para o sistema de produção de eucalipto

Os fluxos físicos e as UEVs são apresentados na Tabela 3.2. Na tabela, apresenta-se os dados de fluxo de energia total e na base anualizada. Os índices de produção relacionam a base de recursos utilizados (entrada) com os produtos obtidos. O índice UEV foi de  $9,02E02$   $\text{sej J}^{-1}$ , considerando-se o conteúdo de energia disponível e de  $6,7E12$   $\text{sej m}^{-3}$ , considerando-se o volume obtido. Para os índices EYR, EIR e ELR, os valores encontrados foram 2,54; 0,65 e 0,65, respectivamente. A produção foi determinada em unidades volumétrica (metros cúbicos) e energética (joules) na seção denominada *Produtos* da Tabela 3.2. O sistema estudado produziu  $290,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de madeira, representando  $2,16E12 \text{ J ha}^{-1}$ .

Tabela 3.2 – Síntese de energia para plantações de eucalipto (rotação de 7 anos)

| Nota                     | Insumo            | Quantidade<br>unidade ha <sup>-1</sup> | Unidade        | UEV<br>sej unidade <sup>-1</sup> | Fluxo de energia                        |   |
|--------------------------|-------------------|--|----------------|----------------------------------|---|---|
|                          |                   |  |                |                                  | Por rotação<br>E12 sej ha <sup>-1</sup> | Por Ano<br>E12 sej ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> |
| <b>Fontes ambientais</b> |                   |  |                |                                  |   |   |
| 1                        | Evapotranspiração | 3,85E11                                | J              | 30576                            | 11775,50                                | 1682,21   |
| 2                        | Erosão            | 70000                                  | g              | 7,18E08                          | 25,22                                   | 3,60  |
| <b>Entrada</b>           |                   |  |                |                                  |   |   |
| 3                        | Combustível       | 529,2                                  | l              | 3,85E12                          | 2038,18                                 | 291,17  |
| 4                        | Maquinário        | 14,8                                   | kg             | 6,70E12                          | 99,35                                   | 14,19   |
| 4                        | Mão de obra       | 231,4                                  | h              | 5,89E12                          | 1362,26                                 | 194,61  |
| 6                        | Fertilizante 1    | 260,0                                  | kg             | 4,63E12                          | 1202,95                                 | 171,85  |
| 6                        | Fertilizante 2    | 400,0                                  | kg             | 1,45E12                          | 578,34                                  | 82,62   |
| 7                        | Formicida         | 1,0                                    | kg             | 2,49E13                          | 24,86                                   | 3,55  |
| 8                        | Fertilizante 3    | 150,0                                  | kg             | 1,53E12                          | 229,28                                  | 32,75   |
| 3                        | Óleo lubrificante | 22,8                                   | l              | 3,85E12                          | 87,78                                   | 12,54   |
| 7                        | Herbicida         | 7,6                                    | l              | 2,49E13                          | 188,97                                  | 27,00   |
| 9                        | Muda              | 922,5                                  | unidade        | 1,71E11                          | 157,75                                  | 22,54   |
| 10                       | Água              | 5556,0                                 | kg             | 1,26E09                          | 7,00                                    | 1,00  |
| 11                       | Calcário          | 1,0E06                                 | g              | 1,68E09                          | 1680,00                                 | 240,00  |
| <b>Produtos</b>          |                   |  |                |                                  |   |   |
| 12                       | Biomassa colhida  | 290,5 <sup>†</sup>                     | m <sup>3</sup> | ST <sub>1</sub>                  | 19457,44                                | 2779,63   |
| 13                       |                   | 2,16E12 <sup>§</sup>                   | J              | ST <sub>2</sub>                  | 19457,44                                | 2779,63   |
|                          | ST <sub>1</sub>   | UEV da biomassa colhida (volume)       |                |                                  | 6,70E12                                 | sej m <sup>-3</sup>                                   |
|                          |                   |  |                |                                  | 9,57E11                                 | sej m <sup>-3</sup> ano <sup>-1</sup>                 |
|                          | ST <sub>2</sub>   | UEV da biomassa colhida (energia)      |                |                                  | 9,02E02                                 | sej J <sup>-1</sup>                                   |
|                          |                   |  |                |                                  | 1,29E02                                 | sej J <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>                 |
|                          | EYR               | 2,54                                   |                |                                  |   |   |
|                          | ELR               | 0,65                                   |                |                                  |   |   |
|                          | EIR               | 0,65                                   |                |                                  |   |   |

Nota: Fertilizante 1 é formulação 06-30-10, o fertilizante 2 é a formulação 14-00-15 e o fertilizante 3 é o KCl.

† Considerando-se o uso da biomassa para indústria de celulose e papel.

§ Considerando-se o uso da biomassa para energia.

1. UEV para evapotranspiração = 2,91E4 sej J<sup>-1</sup> Brown e Bardi (2001) citando Doherty (1995), Evapotranspiração = (7796 mm ha<sup>-1</sup>) \* (1E4 L mm<sup>-1</sup> ha) \* (1 kg L<sup>-1</sup>) \* (4,94E3 J kg<sup>-1</sup>).
2. Erosão de solo baseada do conteúdo da matéria orgânica = (5,4E4 kcal kg<sup>-1</sup> OM)\*(1,28% OM)\*(4,17E3 J Kcal<sup>-1</sup>)\* (2,4E5 sej J<sup>-1</sup> por COHEN et al, 2006) = 7,18E11 sej kg<sup>-1</sup>.
3. UEV para combustível (ODUM, 1996) = (1,32E8 J galão<sup>-1</sup>) \* (1 galão 3,8 L<sup>-1</sup>) \* (1,1E5 sej J<sup>-1</sup>) = 3,85E7 sej L<sup>-1</sup>.
4. UEV para depreciação emergética de maquinário = (6,7E9 sej g<sup>-1</sup>), Brown e Bardi (2001) citando Doherty (1995), Por kg = (6,7E9 sej g<sup>-1</sup>) \* (1000 g kg<sup>-1</sup>) = 6,70E12 sej kg<sup>-1</sup>.
5. UEV para mão de obra 4,5E6 sej J<sup>-1</sup>, Brandt-Williams (2001), Energia contida na mão de obra humana = (231,8 h) \* (2500 kcal dia<sup>-1</sup>) \* (dia 8 h<sup>-1</sup>) \* (4186 J kcal<sup>-1</sup>) = 3,03E8 J.
6. UEVs: K<sub>2</sub>O = 2,92E9 sej g<sup>-1</sup> K (ODUM, 1996) \* 83% K K<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 2,99E10 sej g<sup>-1</sup> P (ODUM, 1996) \* 43,7% P P<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>-1</sup>, N = 7,7E9 sej g<sup>-1</sup> N (ODUM, 1996), 06-30-10 tem 6% N, 30% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 10% K<sub>2</sub>O; e 14-00-15 tem 14% N e 15% K<sub>2</sub>O.
7. Baseado na UEV de defensivos 2,49E10 sej g<sup>-1</sup> \* 1000 g kg<sup>-1</sup>, Brandt-Williams (2001).
8. UEV: K<sub>2</sub>O = 2,92E9 sej g<sup>-1</sup> K (ODUM, 1996) \* 1000 g kg<sup>-1</sup>, KCl \* 63% K<sub>2</sub>O KCl<sup>-1</sup> \* 83% K-K<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>.
9. Tabela 3.1.
10. Energia química potencial da água (4,94E3 J kg<sup>-1</sup>) multiplicado pela UEV de irrigação (4,28E5 sej J<sup>-1</sup>, Doherty (1995) = 1,26E9 sej kg<sup>-1</sup> ou 1,26E9 sej L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O.
11. UEV do calcário (1,68E10 sej g<sup>-1</sup>) (ODUM, 1996).
12. Produtividade = (40,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) \* (7 anos) = 290,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.
13. Conteúdo de energia da madeira = (290,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) \* (495 kg m<sup>-3</sup>) \* (1,5E7 J kg<sup>-1</sup>) = 2,16E12 J ha<sup>-1</sup>, Conteúdo de energia por Meada e Pimentel (2006) citando Hakkila e Parikka (2002).

Para se avaliar a base de recursos desse sistema de produção, iniciou-se pela listagem dos recursos utilizados na alternativa tradicional de controle de acidez do solo, calcário. Tal como para as mudas, um pequeno número de insumos representou a maioria da energia demandada. Nesse caso, os cinco principais insumos corresponderam a 97,0% do total. O insumo primário ao processo produtivo foi a evapotranspiração (decorrente da precipitação, luz e vento), responsável por 60,5% da energia total utilizada pelo cenário tradicional (Figura 3.8a) e na sequência o combustível (10,5%), fertilizante (10,3%), calcário (8,6%) e mão-de-obra (7,0%).

As alternativas de controle de acidez do solo, cinzas (Figura 3.8b) e bio sólido (Figura 3.8c), apresentam respostas similares, com diferentes proporções em função das diferenças no conteúdo energético dos materiais alternativos ao calcário aplicados no sistema de produção avaliado. Quando se faz uso das alternativas ao calcário, as cinzas e o bio sólido representam o insumo mais demandante de energia dentro do fluxo adquirido no mercado (F), ficando atrás apenas da evapotranspiração. No cenário tradicional (Figura 3.8a), o material (calcário) é o terceiro mais demandante em F.

#### Análise das operações mecanizadas

Para se avaliar a demanda de cada operação do manejo dos talhões, dividiu-se o processo produtivo em operações (colheita, controle de acidez do solo, adubações entre outras) e relatou-se a energia demandada na forma de insumos, combustível, depreciação energética de maquinário e mão-de-obra para cada operação (Tabela 3.3). Cada linha dessa tabela traz a participação no total de insumos adquiridos (F) para as operações apresentadas.



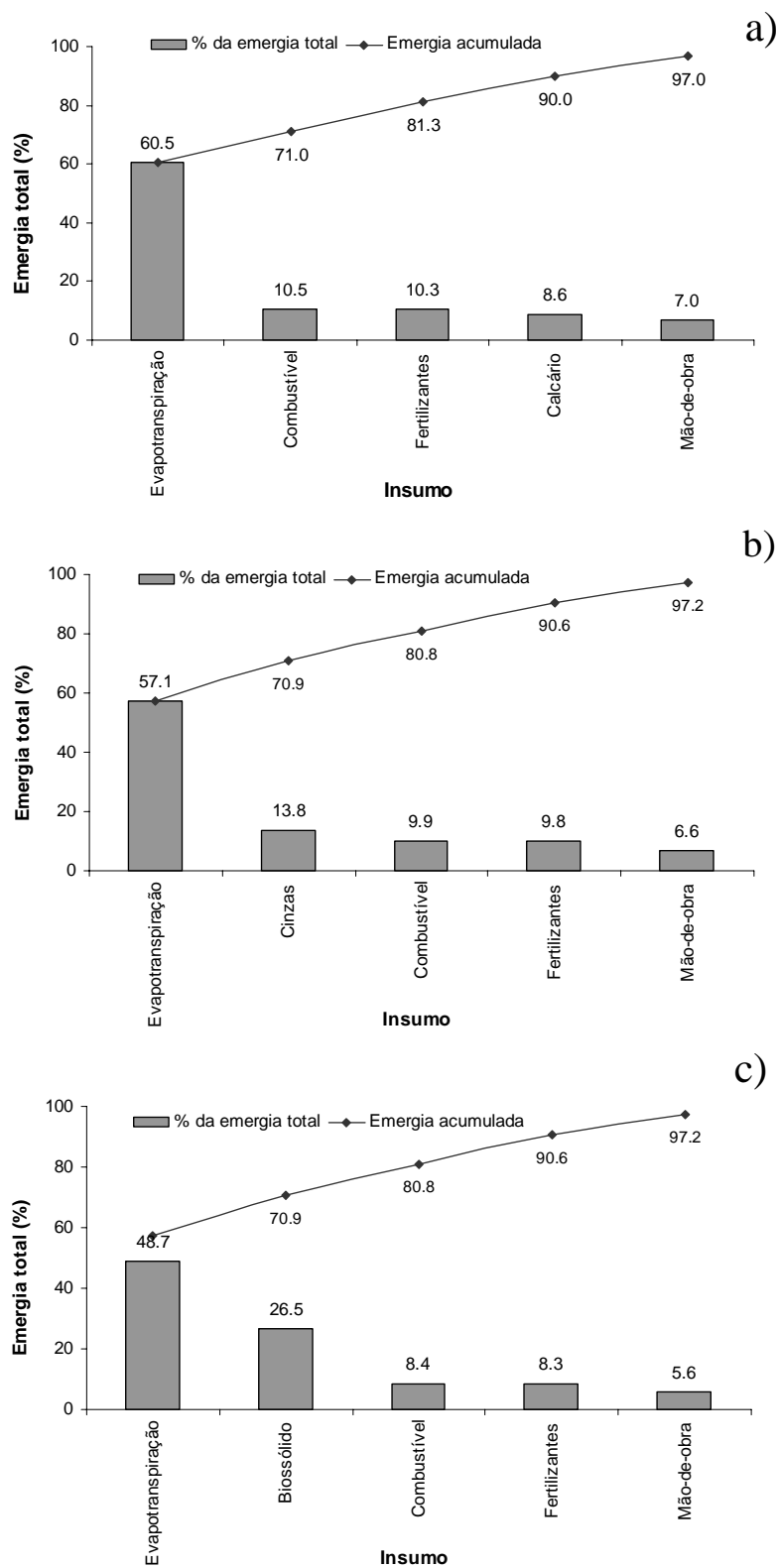


Figura 3.8 – Demanda de energia nas alternativas calcário(a), cinzas (b) e bio sólido (c) para o controle de acidez do solo no sistema de produção de eucalipto avaliado

Tabela 3.3 – Porcentagem de energia em insumos adquiridos (F) por operação e fator de produção

| Operações                              | Demanda de energia por fator de produção (%) |                        |             |                 |             |
|--|--|------------------------|-------------|-----------------|-------------|
|  | Combustível                                  | Depreciação emergética | Mão de obra | Insumo agrícola | Total       |
| Colheita                               | 24,2   | 1,0                    | 13,0        | 1,2             | <b>39,4</b> |
| Calagem                                | 0,2  | 0,0                    | 0,1         | 22,0            | <b>22,3</b> |
| Subsolagem (+fertilizante e herbicida) | 0,5  | 0,0                    | 0,2         | 16,1            | <b>16,8</b> |
| Adubação de cobertura (2º ano)         | 0,2  | 0,0                    | 0,1         | 4,7             | <b>5,0</b>  |
| Adubação de cobertura (3º mês)         | 0,1  | 0,0                    | 0,1         | 3,0             | <b>3,2</b>  |
| Adubação de cobertura (8º mês)         | 0,2  | 0,0                    | 0,1         | 2,8             | <b>3,1</b>  |
| Plantio                                | 0,1  | 0,0                    | 0,8         | 2,0             | <b>2,9</b>  |
| Outros                                 | 1,3  | 0,1                    | 3,5         | 2,3             | <b>7,2</b>  |
| <b>Total</b>                           | <b>26,7</b>                                  | <b>1,3</b>             | <b>17,8</b> | <b>54,1</b>     | 100         |

\* Na subsolagem, dos 16,1% do total de energia que ela representa, 15,7% se deve ao fertilizante (06-30-10) e 0,4% ao herbicida.

A colheita concentra a maioria da energia em insumos adquiridos (39,4%), quase toda na forma de combustível e mão-de-obra. A demanda na colheita é alta em função da baixa capacidade de campo operacional ( $0,055 \text{ ha h}^{-1}$ ). O controle de acidez do solo, calagem, correspondeu a 22,3% da energia total, sendo que 22,0% corresponderam ao calcário aplicado. Os fertilizantes aplicados representaram 26,2% da energia adquirida, sendo 10,5% em três adubações de cobertura mais 15,7% no plantio. A magnitude de energia contida nos fertilizantes supera à do calcário, quando considerados agrupados. Quando se avalia as operações realizadas, esse valor se dilui em quatro adubações ao passo que o calcário é aplicado em uma única vez. Isso sugere que, da perspectiva de melhoria da eficiência ecológica, o foco primário deveria ser a eficiência de colheita, uso de fertilizantes e manejo de acidez do solo. O soma dos fertilizantes (26,2%) não confere com a soma dos insumos das quatro operações em que eles são aplicados, subsolagem (+fertilizante e herbicida) e adubações de cobertura (3º mês, 8º mês e 2º ano), pois no cálculo da subsolagem 15,7% dos 16,1% se refere ao fertilizante 06-30-10, o restante se refere ao herbicida aplicado.

A aplicação de herbicida somou 1,5% da energia adquirida e foi incluída na linha “Outros” na Tabela 3.3. No total, os insumos indiretos (combustível e mão-de-obra) somam mais de 44,5% da energia adquirida (F), reforçando a necessidade de monitorar o fluxo material. Os insumos

agrícolas demandados representam a maior parte da energia, 54,1% da energia adquirida (F). O combustível representou 26,7%, a mão-de-obra 17,8% e a depreciação emergética 1,3%.

O insumo direto de maior participação no cenário avaliado é representado pelos fertilizantes, quando agrupados (26,2% - 10,5% em três adubações cobertura e 15,7% no plantio). Porém, individualmente é o calcário (22,0%), seguido do fertilizante formulado 06-30-10 utilizado no plantio (15,7%). Dentre os nutrientes presentes nos fertilizantes, o fósforo é o material de maior intensidade emergética, seguido de nitrogênio e potássio.

O manejo da acidez do solo é um problema mais complexo. Enquanto mostrou-se que o calcário propiciou o controle de acidez com o menor uso de energia, o uso de resíduos como cinzas e bio sólido requer pesquisas futuras, dentro de um contexto mais abrangente. As análises de sistemas em escala mais ampla podem mostrar benefícios substanciais no uso desses resíduos como um resultado da compensação da demanda de recursos para a obtenção de calcário e também por ser desnecessário descartar esses resíduos. Ambas alternativas, bio sólido e cinzas, requerem recursos para serem despejados, por exemplo, em aterros sanitários. O uso dessas alternativas economiza também a energia demandada na extração de calcário, o que pode compensar a maior energia embutida neles. Odum (1996) discute a necessidade de se realizar análises de multi-escala no desenvolvimento de políticas públicas. Se um produto representa um fluxo de perda que pode ser desviado para uso produtivo, então pode ser apropriado omitir sua energia da análise quantitativa dos recursos demandados. Isso não foi feito nesse estudo porque a fonte de material nem sempre é conhecida, porém melhorias futuras na eficiência ambiental podem trazer uma análise mais apropriada desses insumos.

#### Alternativas de controle de acidez do solo

Avaliou-se três alternativas de correção de acidez do solo: aplicações de calcário, cinzas e bio sólido. Destaca-se que as cinzas e bio sólido têm teores consideráveis de nutrientes (NPK – nitrogênio, fósforo e potássio), porém, na Empresa avaliada, o planejamento de adubações é mantido o mesmo com as três alternativas. O bio sólido é aplicado na taxa de 7000 kg MS ha<sup>-1</sup> e as cinzas são aplicadas a 3000 kg MS ha<sup>-1</sup> (Tabela 3.4). As diferenças observadas entre os cenários de manejo de acidez se devem à quantidade de insumos aplicada. O aumento de consumo de combustível, mão-de-obra e depreciação emergética de maquinário, em função das

diferentes capacidades de campo operacionais, nas diferentes aplicações é ínfimo, conforme já apresentado na Tabela 3.3 (página 89).

A demanda por recursos (energia) nas duas alternativas é maior do que com o calcário (Tabela 3.4). A energia contida no calcário aplicado ( $1,68E16$  sej) é aproximadamente metade da contida nas cinzas aplicadas e um quarto da contida no biossólido. Isso se deve à quantidade de material aplicado, já que as UEVs das cinzas e do biossólido, determinada com base no teor de matéria orgânica deles, são inferiores às do calcário. Os índices da síntese emergética para esses cenários sugerem que a base de recursos para a produção é consideravelmente superior tanto com cinzas ( $UEV = 9,56E2$  sej  $J^{-1}$ ) quanto com biossólido ( $UEV = 1,12E3$  sej  $J^{-1}$ ), correspondendo a um decréscimo na eficiência ambiental de 5,9% e 24,3%, respectivamente. Os decréscimos na razão de rendimento emergético (EYR) resultam uma menor agregação de recursos pelo processo produtivo em relação aos recursos oriundos da economia, adquiridos no mercado. Os acréscimos na razão de energia investida (EIR) indica menor auto-suficiência no provimento de recursos demandados pelo processo produtivo ou menor eficiência no uso dos recursos exógenos nele investidos.

Tabela 3.4 – Características das alternativas de controle de acidez do solo

| Parâmetros do sistema de produção           | Cenário   |                   |                    |
|---|-----------|-------------------|--------------------|
|   | Calcário  | Cinzas            | Biossólido         |
| Massa aplicada (kg)                         | 1000      | 3000              | 7000               |
| Energia incorporada na massa aplicada (sej) | $1,68E16$ | $2,84E16^\dagger$ | $6,40E16^\ddagger$ |
| UEV do produto final obtido (sej $J^{-1}$ ) | $9,02E02$ | $9,56E02$         | $1,12E03$          |
| EYR   | 2,54      | 2,34              | 1,95               |
| ELR   | 0,65      | 0,75              | 1,05               |
| EIR   | 0,65      | 0,75              | 1,05               |

$^\dagger$  - Baseado no conteúdo de material orgânica =  $(3,0E6 \text{ g ha}^{-1}) * (0,3363 \text{ g MO g}^{-1}) * (5,4 \text{ kcal g}^{-1}) * (4186 \text{ J kcal}^{-1}) * (1,2E5 \text{ sej J}^{-1} \text{ ODUM, 1996}) = 9,45E11 \text{ sej kg}^{-1}$ . Composição das cinzas por Benedetti (1994).

$^\ddagger$  - Baseado no conteúdo de material orgânica =  $(7,7E6 \text{ g ha}^{-1}) * (0,29584 \text{ g MO g}^{-1}) * (5,4 \text{ kcal g}^{-1}) * (4186 \text{ J kcal}^{-1}) * (1,2E5 \text{ sej J}^{-1} \text{ ODUM, 1996}) = 8,31E11 \text{ sej kg}^{-1}$ . Composição do biossólido por Oliveira (2000).

### Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade quantificou o grau em que as alterações no manejo dos talhões afetariam a eficiência ambiental geral, utilizando-se do índice UEV como medida. A variação da demanda total de recursos para as alterações sugeridas nas operações está relacionada na Tabela 3.5. Essas alterações foram feitas relativas ao cenário básico, com calagem, detalhado na Tabela 3.2 (Pág. 86).

Tabela 3.5 – Variação da demanda de energia para as alternativas de manejo de acidez do solo (cenário calcário como base 100)

| Cenário             | Calcário | Cinzas | Biossólido |
|---------------------|----------|--------|------------|
| Original            | 100,0    | 106,0  | 124,4      |
| + EC <sup>†</sup>   | 98,4     | 104,3  | 122,7      |
| - POT <sup>‡</sup>  | 99,0     | 105,0  | 123,4      |
| + VU <sup>§</sup>   | 100,0    | 105,9  | 124,3      |
| - MO <sup>¶</sup>   | 99,3     | 105,3  | 123,4      |
| - Ins <sup>††</sup> | 97,9     | 103,3  | 119,9      |

† - Aumento na eficiência de campo em 10%, baseado na alteração da largura e velocidade de trabalho, esquemas de manutenção, geometria de talhões.

‡ - Redução na potência do maquinário em 10%.

§ - Aumento na vida útil do maquinário em 10%.

¶ - Redução do insumo de mão de obra em 10%.

†† - Decréscimo em 10% dos insumos agrícolas aplicados, exceto evapotranspiração e mudas.

O aspecto mais significativo foi o grau em que as decisões alternativas de manejo de acidez dominam outras abordagens para mudança na eficiência ambiental. A maior diferença observada dentro de cada esquema de manejo de acidez de solo foi de até apenas 2,1% (Tabela 3.5). A diferença atribuída à escolha do material regulador de acidez foi de até 24,4%.

A maior melhoria dentro de um esquema de manejo de acidez (2,1%) foi a redução de insumos (-Ins). A viabilidade desse cenário é dada por técnicas como aplicação localizada de fertilizante ou defensivos, o controle de qualidade das operações, visando-se eliminar desperdícios ou ainda no desenvolvimento de clones com menor demanda por insumos agrícolas.

A segunda maior melhoria no desempenho (1,6%) foi observada pelo aumento da eficiência de campo (cenário +EC), que envolveria o aumento desse fator sem aumentar o consumo de outros insumos. Para concretizar esse nível de melhoria, mão-de-obra e combustível por unidade de área teriam que ser reduzidos.

Diversos mecanismos tornam essa abordagem realista. Por exemplo, a eficiência de campo pode ser melhorada pela definição de formato de talhões mais apropriados para minimizar tempo de manobras. Outros cenários, aumento da vida útil de maquinário, redução de demanda de mão-de-obra e redução da potência do maquinário utilizado, não modificaram consideravelmente a eficiência global do processo. Conseqüentemente, esses não são aspectos do sistema de produção estudado que mereceriam destaque em um primeiro momento, ao se buscar a melhoria da eficiência ambiental.

Um importante aspecto a ressaltar sobre os resultados obtidos é que mesmo pequenas diferenças na eficiência podem ter implicações substanciais no uso de recursos em função das extensas áreas nas quais se cultiva eucalipto.

### Contexto nacional

O Brasil apresenta a razão de energia e moeda (EMR) de 1,20E13 sej US\$<sup>-1</sup> (ano base 2000, SWEENEY et al., 2006). Esse índice geral estima os recursos incorporados em uma unidade monetária de um produto ou serviço. O EMR para a madeira para celulose é 2,68E11 sej US\$<sup>-1</sup> (preço aproximado de 25 US\$ m<sup>-3</sup>, <sup>19</sup>). Isso implica que a operação florestal não oferece benefícios significativos aos compradores no tocante a recursos, menos recursos por unidade monetária que a média nacional. O EMR para mudas é de 1,20E12 sej US\$<sup>-1</sup> (cujo preço unitário é de 0,14 US\$<sup>20</sup>), inferior à relação da economia brasileira, apresentando nenhum benefício de comparação de recursos quando se compara com a escala mais ampla. Certamente esse benefício aconteceria se fosse considerada a comercialização da celulose ou do papel, uma vez que os produtos industrializados apresentam maior agregação de recursos (e valor) que os produtos obtidos no setor primário.

---

<sup>19</sup> J.L. Gava, em comunicação pessoal.

<sup>20</sup> J.L. Stape, em comunicação pessoal.

Os índices nacionais de investimento (EIR = 0,12) e carga ambiental (ELR = 1,00) sugerem que o sistema de produção avaliado se encontra bem situado na economia brasileira. Os valores dos mesmos índices para esse processo produtivo (EIR = 0,65 e ELR = 0,65) indicam que um maior investimento econômico é requerido, ao passo que apresenta menor impacto ao ambiente que a média nacional. O EIR é inferior ao valor típico de operações agrícolas intensas (BRANDT-WILLIAMS, 2001), mas é típico da amplitude alcançada das operações florestais tropicais (ODUM et al., 2000). O ELR é apenas ligeiramente menor que a média nacional indicando que o processo apresenta alta intensidade.

#### Comparativo entre sistemas de produção de biomassa florestal

As UEVs determinadas para a biomassa colhida foram  $6,70E12$  sej  $m^{-3}$  e  $9,02E02$  sej  $J^{-1}$ . Doherty (1995) relatou valores de UEV para *Eucalyptus spp.* e *Melaleuca spp.* na Florida, EUA de  $2,71E04$  sej  $J^{-1}$  para a madeira colhida, indicando que o custo de produção em unidades de recursos totais é por volta de 65% menores no processo brasileiro comparado aos dos EUA. Isso se deve tanto às diferenças em produtividade (20,0 versus 12,4 t  $ha^{-1}$  ano $^{-1}$  para o sistema brasileiro e americano, respectivamente) face às diferenças de recursos necessários ( $2,78E15$  versus  $2,41E15$  sej  $ha^{-1}$  ano $^{-1}$ , respectivamente). Esses valores mostram que a intensificação do sistema produtivo pode ser ambientalmente interessante, pois o aumento na produtividade foi proporcionalmente superior ao aumento na demanda de recursos. Quanto às condições climáticas, a região de Itatinga, no estado de São Paulo, onde foi desenvolvido o trabalho, apresentou uma média anual 1530 mm de pluviosidade durante o ciclo de rotação.

Um resumo mais generalizado sobre sistemas de produção de biomassa florestal é apresentado na Tabela 3.6 (DOHERTY, 1995; DOHERTY, et al. 2002; TILLEY e SWANK, 2003). As UEVs variam de  $9,02E02$  sej  $J^{-1}$  (presente estudo) a aproximadamente  $9,0E04$  sej  $J^{-1}$  para angiospermas em Porto Rico e Carolina do Norte, EUA. Entretanto, uma comparação mais significativa seria entre apenas os sistemas visando à produção de celulose. Dentre os sistemas listados, o sistema retratado nesse estudo tem a menor UEV. O UEV médio para madeira para celulose está ao redor de  $1,8E04$  sej  $J^{-1}$ . Uma vez que o UEV mede os recursos requeridos por unidade de produto (nesse caso o joule de energia disponível), o sistema de produção estudado é claramente uma escolha desejável no tocante a sustentabilidade ambiental.

Tabela 3.6 – Síntese de energia de diferentes sistemas de produção de biomassa (dados de biomassa colhida).

| Espécies  | Rotação<br>(ano) | UEV<br>(sej J <sup>-1</sup> ) | EYR  | EIR  | N+R<br>(%) | Local                     |
|---|------------------|-------------------------------|------|------|------------|---------------------------|
| Esse estudo                                     | 7                | 902                           | 2,54 | 0,65 | 60,6       | São Paulo, Brasil         |
| <i>Salix</i> spp. †                             | 4                | 11290                         | 1,33 | 3,02 | 24,9       | Sul da Suécia             |
| <i>Picea abies</i> e <i>Pinus silvestris</i> †  | 80               | 16939                         | 2,51 | 0,66 | 60,4       | Sul da Suécia             |
| <i>Pinus taeda</i> †                            | 30               | 18552                         | 2,57 | 0,64 | 60,8       | Illinois, EUA             |
| <i>Albizia lebbek</i> †                         | 11               | 19043                         | 2,32 | 0,76 | 56,7       | Porto Rico                |
| <i>Eucalyptus</i> spp. e <i>Melaleuca</i> spp † | 5                | 27120                         | 1,38 | 2,61 | 27,8       | Flórida, EUA              |
| Mista (Floresta de angiospermas) †*             | 60               | 33091                         | 3,95 | 0,34 | 74,5       | Illinois, EUA             |
| <i>Pinus elliotii</i> †                         | 25               | 36192                         | 2,82 | 0,55 | 64,5       | Flórida, USA              |
| Floresta tropical secundária †*                 | 140              | 55637                         | 2,27 | 0,79 | 76,6       | Papua Nova Guiné          |
| Mista (Floresta de angiospermas) †*             | n.d.             | 89040                         | n.d. | n.d. | n.d.       | Carolina do Norte,<br>EUA |
| <i>Swietenia macrophylla</i> †*                 | 15               | 92400                         | 18,0 | 0,09 | 61,7       | Porto Rico                |

†Doherty (1995), ‡Odum et al. (2000), ¶ Tilley e Swank (2003), n.d. – não disponível, \*sistemas onde a madeira não era o produto principal.

Todavia, operações variam não apenas na demanda total de recursos, mas também na proporção relativa das fontes de recursos (R, N e F). Isso pode ser importante, pois uma alternativa com menor eficiência, por exemplo, maior UEV, pode ser interessante se a base de recursos suportando o processo é mais dependente de recursos naturais e locais. Esse assunto é discutido no contexto de obtenção de eletricidade em Brown e Ulgiati (2002).

O EYR é comparativamente alto para a produção de madeira para celulose, revelando uma fração substancial de energia de fontes “gratuitas” (estoques locais e fluxos renováveis). O sistema de *Salix* spp., no sul da Suécia, e a produção de eucalipto na Flórida apresentam valores de EYR menores que o do presente estudo, o que implica em um menor retorno sobre investimento. Destaca-se que os valores de EYR não são diretamente comparáveis com o retorno de energia sobre investimento – EROI (MEADA e PIMENTEL, 2006).



A intensidade econômica de cada sistema é resumida no EIR, onde menores valores sugerem menor demanda ou melhor uso dos recursos externos (adquiridos). Apesar da intensidade relativa do sistema de produção estudado, o EIR para ele é comparativamente baixo, figurando entre os mais eficientes e contrastando com outros sistemas tropicais de plantações florestais.

Uma vez que apenas três sistemas listaram os insumos locais não-renováveis (N), não seria válido se comparar o ELR dentre os sistemas de produção de biomassa florestais. Ao invés disso, apresentou-se o percentual de recursos locais (renováveis e não-renováveis) dos diferentes sistemas de produção (N+R%). No de *Pinus elliottii* a matéria orgânica contida no solo foi considerada, no de *Albizia lebbek*, a erosão de solo e o nutriente fósforo (oriundo de intemperismo e chuvas) foram considerados e, no presente estudo, a erosão do solo foi o componente de recursos não-renováveis. Considerando-se esses três sistemas o *Pinus elliottii* apresentou o menor ELR (0,57) devido à menor intensidade das operações e maior período de cultivo, que resulta em menor impacto ambiental. O eucalipto nesse estudo apresentou um ELR inferior ao do *Albizia lebbek* (0,89) que apresenta rotação mais longa (11 anos).

As Figuras 3.9 e 3.10 resumem os contrastes multi-métricos para os vários sistemas de produção de biomassa. Observa-se na Figura 3.9, que o sistema de eucalipto avaliado obteve a maior disponibilização de energia anualizada ( $\text{GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), com demanda de energia intermediária (sej  $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ). Assim, o sistema disponibilizou mais energia não demandando muito recurso. As comparações anualizadas são importantes porque, no processo de decisão entre as alternativas, deve-se abordar o fator tempo, além da produtividade e uso de recursos. Especificamente, a Figura 3.9 revela o grau em que as condições edafoclimáticas locais do Brasil aumentam a produção em comparação com eucalipto na Flórida (*Eucalyptus spp.* e *Melaleuca spp.*).

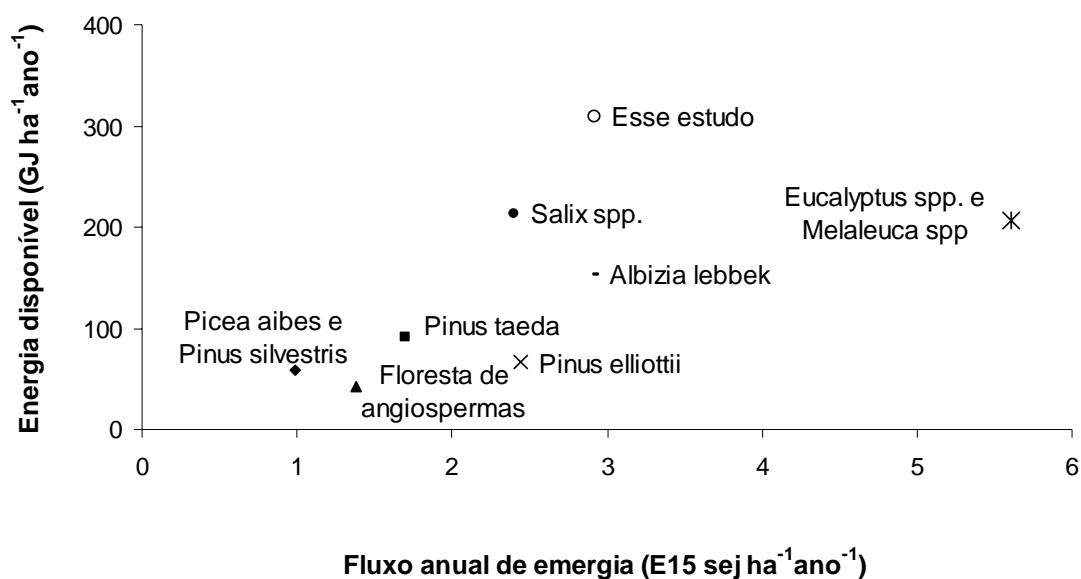


Figura 3.9 – Disponibilização de energia em função de recursos (energia) incorporados

A Figura 3.10 mostra a relação entre a fração de insumos renováveis (R%) e o período de rotação. À medida que a fração renovável cresce, infere-se um aumento da sustentabilidade ambiental. Geralmente, há uma ponderação entre período de rotação e demanda de energia. À medida que o período de rotação aumenta, a fração de recursos que pode ser obtida dos fluxos renováveis pode aumentar, com um máximo por volta de 70%. Uma medida de integrar sustentabilidade (otimizando objetivos econômico e ambiental) seria selecionar os sistemas de produção que fornecem alto rendimento de energia em curtas rotações e com dependência máxima em recursos renováveis. Assim, pontos acima da linha da Figura 3.10 são considerados mais sustentáveis com uma medida quantitativa da distância entre o ponto e a linha. Em muitos aspectos, o sistema avaliado no presente estudo está em um dos extremos do espectro delineado por Odum et al. (2000). No outro extremo estão florestas produzidas menos intensivamente, com demanda reduzida de produtos e serviços, porém com produtividades inferiores em períodos mais longos de produção. Esse estudo em particular se mostra útil por delinear o uso de recursos e implicações de sustentabilidade em um dos extremos do espectro citado.

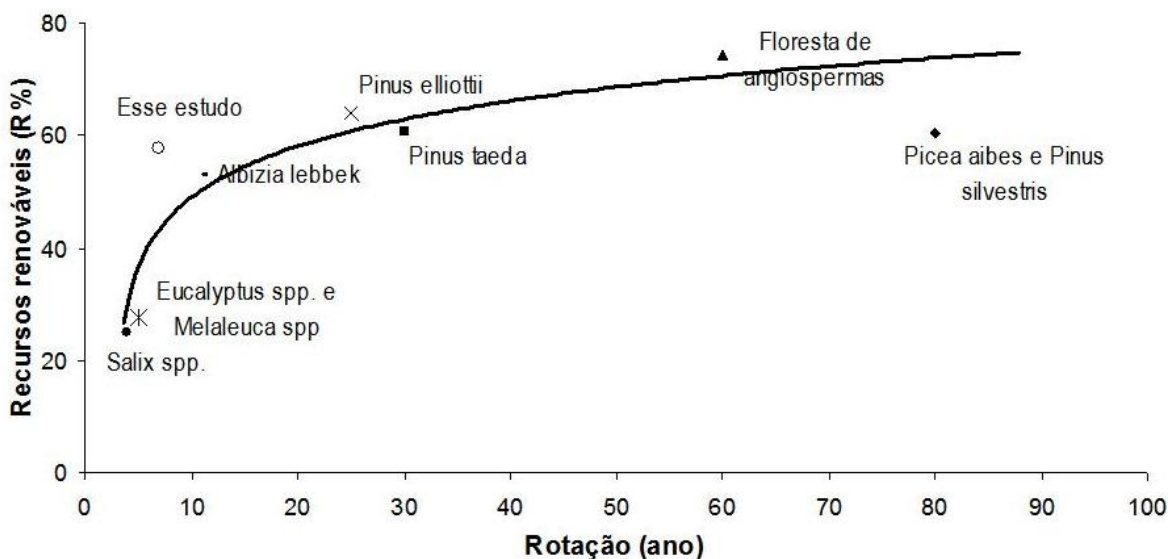


Figura 3.10 – Uso de recursos renováveis em função do tempo de rotação

Observa-se que o eucalipto (rotação de sete anos e 60,6% de recursos renováveis) exibiu o maior desvio positivo da linha de tendência e se agrupa com outras plantações florestais tropicais. A alta intensidade dos sistemas de curta rotação em ambiente subtropical e temperado se situa diretamente sobre a linha, indicando que são menos sustentáveis comparados com os sistemas tropicais.

Os altos rendimentos por unidade de investimento no sistema de produção de eucalipto são refletidos na Tabela 3.6 (página 95) e na Figura 3.11. O sistema apresenta o menor UEV e comparativamente um baixo nível de demanda de recursos externos (adquiridos). O contraste na demanda de recursos adquiridos entre esse sistema e o localizado no sul da Suécia (*Salix spp.*) com UEV mais próxima (11290 sej J<sup>-1</sup> contra 902 sej J<sup>-1</sup> do sistema avaliado) é clara, com o sistema sueco demandando mais recursos.

O sistema de produção de madeira para celulose na área estudada apresenta boa eficiência ambiental. O maior espaço para melhoria na eficiência ambiental deve se situar em como a acidez do solo é manejado em locais com solos ácidos e, em particular, como os materiais utilizados são obtidos. Uma vez que esse estudo apresenta o menor UEV para madeira de celulose, há necessidade de se aplicar essa metodologia em sistemas tropicais de produção de biomassa em curta rotação.

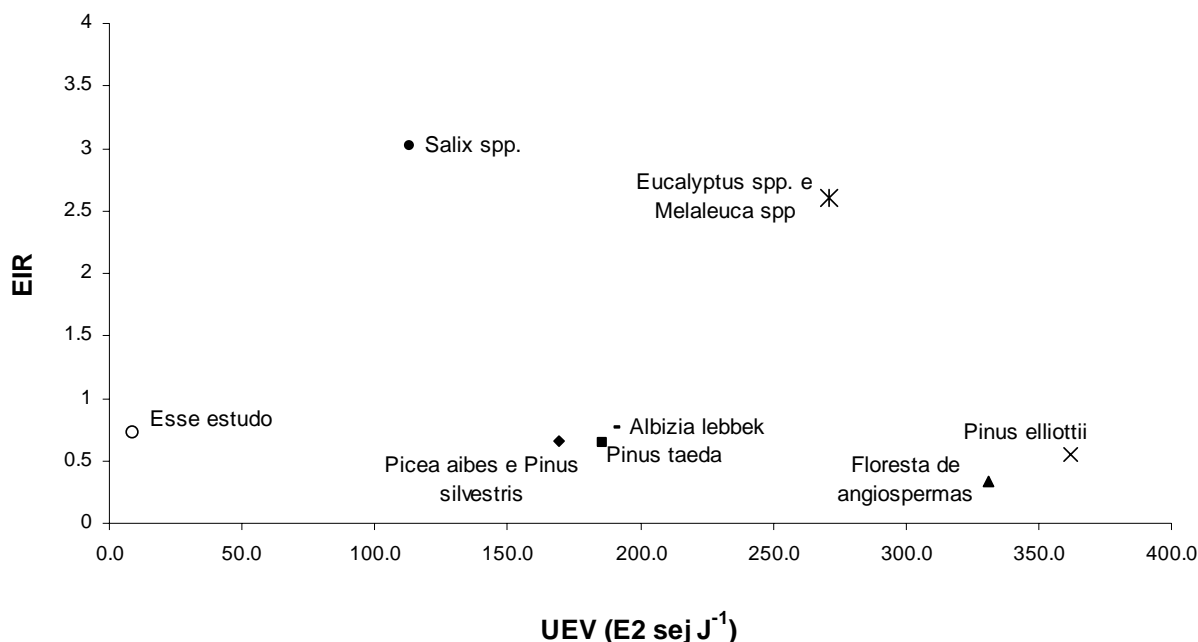


Figura 3.11 – Razão de investimento energético em função do conteúdo energético da biomassa

### 3.3 Conclusões

A síntese de energia do sistema de produção de eucalipto mostrou que os recursos renováveis, representados pela evapotranspiração, foram os principais componentes da energia da biomassa. Quanto aos recursos adquiridos (F), os principais componentes da energia demandada foram os insumos agrícolas, principalmente os fertilizantes, o material de controle de acidez de solo e o combustível. O consumo de combustível e o uso de insumos podem ser reduzidos com a adoção de práticas como a aplicação localizada de defensivos e fertilizantes. O melhoramento genético é uma ferramenta vital no desenvolvimento de clones menos exigentes quanto a nutrientes, demandando menores níveis de adubação.

No tocante às operações mecanizadas, a colheita é a mais importante e demanda quase 40% recursos empregados no sistema de produção. As operações que devem ser priorizadas são a colheita, a correção de acidez e a subsolagem. As duas últimas em função da energia contida nos insumos aplicados na execução delas.

O consumo de combustível e a mão-de-obra na colheita, o calcário e seus potenciais substitutos na correção da acidez do solo e os fertilizantes aplicados devem ser monitorados para que o

desempenho ambiental do sistema de produção possa melhorar, de acordo com os índices de energia.

Os cenários propostos não obtiveram grandes melhorias percentuais no desempenho ambiental. Mesmo assim, deve-se considerar que a magnitude da área em que o eucalipto é cultivado, pois o ganho total na economia de recursos é significativo. O cultivo intensivo do sistema avaliado se mostrou uma opção sustentável de produção de biomassa (menor UEV) comparando-se com sistemas de ciclo mais longos e menos intensivos. O sistema apresentou ainda uma considerável agregação de recursos locais à biomassa produzida (EYR). A atividade silvicultural, embora não atinja a média da relação de energia e moeda para o país, é fundamental para que esse benefício ocorra em uma escala mais ampla, produção de celulose e papel. Comparando-se com a média do país o sistema não faz uso dos recursos exógenos tão eficientemente (EIR), porém comparando-se com os outros sistemas de produção de biomassa, o sistema está localizado entre os mais eficientes. Quanto aos impactos ambientais (ELR) proporcionado a atividade está abaixo da média nacional.

### **3.4 Conclusões Gerais**

Com base nas conclusões parciais desenvolvidas nos capítulos 2 e 3 do presente trabalho, indica-se que o combustível e os fertilizantes são os principais fatores a ser monitorados nos sistemas de produção de eucalipto. Quanto às operações, a colheita é a maior demandante de recursos, e a busca por maior eficiência da realização das operações e a redução do uso de insumos sem redução ou com redução proporcionalmente menor da produtividade é uma forma de se buscar patamares satisfatórios à sustentabilidade.

As diferenças encontradas entre as alternativas de controle de acidez do solo, embora de grande magnitude, não consideraram os benefícios indiretos da utilização de resíduos, como não ter que despejar no ambiente os resíduos utilizados, além de diminuir a extração de calcário. Novos estudos são necessários para determinar em uma escala mais ampla quais os custos e benefícios para a sociedade.

Tanto os índices utilizados da análise de energia quanto os da síntese energia podem ser adotados no monitoramento de um sistema de produção florestal, porém é bom ter em conta as

deficiências de cada um. A análise de energia não traduz benefícios indiretos como, por exemplo, o aumento de matéria orgânica no solo em sistema de cultivo mínimo ou plantio direto, a médio e longo prazo. A síntese de energia tem como barreira a aceitação tanto em função da nomenclatura distinta e dos conceitos envolvidos em sua metodologia. Como grande vantagem a energia apresenta o enfoque sistêmico para a execução da síntese.

Ambas as metodologias, análise de energia e síntese de energia, deveriam ser consideradas na avaliação de um sistema produtivo, uma vez que tratam de uso de recursos, classificam seus produtos quanto à intensidade (IE na energia e UEV na energia) e ainda quantificam o processo produtivo (BE e EROI na energia, UEV do produto final na energia). Os índices EYR, EIR e ELR indicam, respectivamente, a agregação de recursos locais, a eficiência de uso de recursos exógenos e a renovabilidade do sistema produtivo.

## Referências

BASTIANONI, S., MARCHETTINI, N., PANZIERI, M., TIEZZI, E. Sustainability assessment of a farm in the Chianti area (Italy). **Journal of Cleaner Production**. Amsterdam, v.9, n.5, p.365-373, Aug. 2001.

BENEDETTI, V. Utilização de resíduos industriais na Ripasa S/A celulose e papel como insumos na produção florestal. In: GUERRINI, I.A.; BELLOTE A.F.J.; BÜLL, L.T. (Ed.). SEMINÁRIO SOBRE USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E URBANOS EM FLORESTAS, 1994, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP, 1994. p.141-154.

BRANDT-WILLIAMS, S. **Emergy of Florida agriculture**. Handbook of Emergia Evaluation. Folio #4. Center for Environmental Policy. University of Florida. 40p. 2001.

BROWN, M.T.; ARDING, J. **Transformities working paper**. Center para Wetlands: Gainesville, Univ. of Florida, 1991. 37p.

BROWN, M.T.; BARDI, E. **Emergy of ecosystems**. Handbook of Emergia Evaluation. Folio #3. Center for Environmental Policy. University of Florida. 2001. 94p.

BROWN, M.T.; BURANAKARN, V. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. **Resources Conservation & Recycling**. Amsterdam, v.38, n.1, p.1-22, Apr. 2003.

BROWN, M.T.; ULGIATI, S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. **Ecological Engineering**. Amsterdam, v. 9, n.1/2, p.51-69. Sep 1997.

BROWN, M.T., ULGIATI, S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. **Journal of Cleaner Production**. Amsterdam, v.10, n.4, p. 321-334, Aug. 2002.

BROWN, M.T.; ULGIATI, S. Emergy and Environmental Accounting. In: CLEVELAND, C. (Ed.). **Encyclopedia of energy**. New York: Elsevier. 2004. p. 329-354.

BRUNDTLAND, G.H. (Ed). **Our common future: The World Commission on Environment and Development**, Oxford: Oxford University Press. 1987. 373p. BRUNDTLAND COMMISSION REPORT

COHEN, M.J., BROWN, M.T., SHEPHERD, K.D. Evaluation of Soil Erosion Costs at Multiple Scales in Kenya using Emergy Synthesis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. Amsterdam, v.114, n.2/4, p.249-269, Jun 2006.

DeSIMONE, L.; POPOFF, F. **Eco-efficiency – The business link to sustainable development**. Cambridge: MIT Press, 1997. 292p.

- DIAZ-BALTEIRO, L., RODRIGUEZ, L.C.E. Optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration—A comparison of results in Brasil and Spain. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v.229, n.1/3, p.247–258, Jul. 2006.
- DOHERTY, S.J. **Emergy evaluations and limits to forest production**. 1995. 163p. Dissertation (PhD in Environmental Engineering Science). Dept. of Environmental Engineering Sciences, Univ. of Florida, Gainesville. 1995.
- DOHERTY, S.J.; NILSSON, P.O.; ODUM, H.T. **Emergy evaluation of forest production and industries in Sweden**. Swedish University of Agricultural Sciences: Department of Bioenergy, 2002. 78p. (Report, 1).
- ESTY, D.C.; CHERTOW, M. Thinking ecologically: an introduction. In: CHERTOW, M., ESTY, D.C. (ED.) **Thinking ecologically: building the next generation of environmental policy**. New Haven: Yale University Press, 1997. p. 1-14.
- FAO. **State of the World's Forests**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1999. 146 p.
- GARLIPP, R.C. O setor florestal privado brasileiro e os desafios para o seu desenvolvimento. In: RODRIGUEZ, L.C.E (Ed.) SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO DE GESTÃO E ECONOMIA FLORESTAL. Porto Seguro, 2001. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 2001. p.45-67.
- GIANNETTI, B.F. BARRELLA, F.A. ALMEIDA, C.M.B. A combined tool for environmental scientists and decision makers: ternary diagrams and emergy accounting. **Journal of Cleaner Production**, v.12, n.2, p.201-210, 2006.
- HAKKILA, P., PARIKKA, M. Fuel resources from the forest. In: RICHARDSON, J.; BJÖRHEDEN, R.; HAKKILA, P.; LOWE, A.T.; SMITH, C.T. (Ed.). **Bioenergy from sustainable forestry: guiding principles and practice**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. p. 19–48.
- HALL, C.A.S. The myth of sustainability development – personal reflection on energy, its relation to neoclassical economics and Stanley Jevons. **Journal of Energy Resource Technology**, New York, v.126, n.2, p.85-89, Jun. 2004.
- HALL, C., THARAKAN, P., HALLOCK, J., CLEVELAND, C., JEFFERSON, M. Hydrocarbons and the evolution of human culture. **Nature**, London, v.426, n. 6964, p.318-322, Nov 2003.
- LOPES, J.L.W. **Produção de Eucalyptus grandis W. (Hill ex. Maiden) em diferentes substratos e lâminas de irrigação**. 2004. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Botucatu, 2004.
- MEADA, D.J.; PIMENTEL, D. Use of energy analyses in silvicultural decision-making. **Biomass and Bioenergy**, London, v.30, n.4, p.357–362, Apr 2006.



ODUM, H.T. Self organization, transformity, and information. **Science**, Washington, v.242, n.4882, p.1132-1139. Nov. 1988.

ODUM, H.T. **Environmental Accounting**: Emergy and decision making. New York: John Wiley, 1996. 370 p.

ODUM, H.T. **Emergy of global processes**. Handbook of emergy evaluation. Folio #2. Center for Environmental Policy. University of Florida, 2000. 28p.

ODUM, H.T.; DOHERTY, S.J.; SCATENA, F.N.; KHARECHA, P.A. Emergy evaluation of reforestation alternatives in Puerto Rico. **Forest Science**, Washington, v.46, n.4, p.521-530, Nov 2000.

OLIVEIRA, F.C. **Disposição de Biossólido de esgoto e composto de lixo urbano num latossolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 246p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2000.

OLIVEIRA JUNIOR, E.D. **Análise energética de dois sistemas de colheita mecanizada de eucalipto**. 2005. 76p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, New York, v.67, n.1, p.1-85, May 1999.

RANIUSA, T.; EKVALLB, H.; JONSSONA, M.; BOSTDEBT, G. Cost-efficiency of measures to increase the amount of coarse woody debris in managed Norway spruce forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.206, n.1/3, p.119-133, Feb 2005.

SHIREMAN, W.K. Business strategies for sustainable profits: systems thinking in practice. **Systems Research and Behavioral Science**, New York, v. 16, n.5, p.453-462. May 1999.

STAPE, J.L.; BALLONI, E.A. O uso de resíduos na indústria de celulose e como insumos na produção florestal. Piracicaba, **IPEF**, Piracicaba, v.40, p.33-37, 1988.

SWEENEY, S.; COHEN, M.J.; KING, D.M.; BROWN, M.T. Creation of a Global Emergy Database for Standardized National Emergia Synthesis. In: BIENNIAL EMERGY RESEARCH CONFERENCE, 4., 2006, Gainesville, **Proceedings...** Gainesville: University of Florida Press, 2006. p.213-241.

TELLARINI, V.; CAPORALI, F. An input/output methodology to evaluate farms as sustainable agroecosystems: an application of indicators to farms in central Italy. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.77, n.1/2, p.111-123, Jan 2000.

TILLEY, D.R.; SWANK, W.T. EMERGY-based environmental systems assessment of a multi-purpose temperate mixed-forest watershed of the southern Appalachian Mountains, USA. **Journal of Environmental Management**, New York, v.69, n.3, p.213-227, Nov 2003.

## Referências - Anexos

FERRARO JÚNIOR, L.A. **Proposição de método de avaliação de sistemas de produção e de sustentabilidade**. 1999. 132p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

FLUCK, R.C.; BAIRD, C.D. **Agricultural energetics**. Gainesville: University of Florida/Agricultural Engineering Department and Institute de Food and Agricultural Sciences, 1982. 197p.

HETZ, E.J.; VILLEGAS, H.B.; RIQUELME, J.S.; CELIS, J.H. Utilizacion de energia en la produccion de raps, bajo cuatro sistemas de labranza, en la Provincia de Ñuble. **Agro Sur**, Valdivia, v.22, n.1, p.1-6, jan. 1994.

MARTINEZ-ALIER, J. **Ecological economics**. New York: Basil Blackwell, 1987. 286 p.

MILLER, G.A. The flux of tidal energy out of the deep oceans. **Journal Geophysical Resouces**. New York, v. 71, n.2, p.2485-2489, May 1966.

McGRANE, G. **Simulating whole earth cycles using hierarchies and other general systems concepts**. 1998. 371 p. Dissertation (Ph.D. in Environmental Engineering Sciences) - University of Florida, Gainesville, 1998.

ODUM, H.T. Enmergy in ecosystems. in Polunin, N. (Ed.) **Environmental monographs and symposia**. New York: John Wiley, 1986. p. 337-369

ODUM, H.T. **Ecological and general systems**. Niwot: Univ. Press of Colorado, 1993. 644 p.

ODUM, H.T. **Environmental accounting: emergy and decision making**. New York: John Wiley, 1996. 370 p.

ODUM, H.T., ODUM, E.C.; BROWN, M.T. **Environment and society in Florida**. Boca Raton: Lewis Publ., 1998. 449 p.

ODUM, H.T.; WOJCIK, W.; PRITCHARD JR, L.; TON, S; DELFINO, J.J.; WOJCIK, M.; PATEL, J.D.; DOHERTY, S.J. 1998. **Gaia Wetlands for Heavy Metals and Society**. Univ. of Florida, Gainesville: Center for Environmental Policy and Center for Wetlands, 1998. 297 p., (Report to Sendzimir Foundation).

OLIVEIRA JUNIOR, E.D. **Análise energética de dois sistemas de colheita mecanizada de eucalipto**. 2005. 76p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

PELLIZZI, G. Use of energy and labour in Italian agriculture. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v.52, n.2, p.111-119, Feb 1992.

PIMENTEL, D. **Handbook of energy utilization in agriculture**. Boca Raton: CRC Press. 1980. 475p.

SCIENCEMAN, D. Energy and Emergy. In Pillet, G.; Murota, T. (Ed.) **Environmental economics**. Geneva: Roland Leimgruber, 1987. p. 257-276.

SCIENCEMAN, D.; H.T. ODUM; M. T. BROWN. Letters to the Editor. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v.9, n.3/4, 1997, p.212-218.

SCLATER, J.F.; TAUPART, G.; GALDSON, I.D. The heat flow through the oceanic and continental crust and the heat loss of the earth. **Reviews of Geophysics and Space Physics**. Richmond, v.18, n.3, p.269-311, Aug 1980.

**ANEXOS**

**Anexo A – Índices energéticos de alguns fertilizantes.**

| Fertilizantes                  | MJ kg <sup>-1</sup> | Fonte                 |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|
| N                              | 74,00               | Pellizzi (1992)       |
| Uréia                          | 78,04               | Ferraro Junior (1999) |
| Amônia anidra                  | 68,03               | Ferraro Junior (1999) |
| Nitrato de amônio              | 77,03               | Ferraro Junior (1999) |
| Sulfato de amônia              | 21,98               | Ferraro Junior (1999) |
| Nitrato de potássio            | 14,65               | Ferraro Junior (1999) |
| Nitrato de cálcio              | 16,74               | Ferraro Junior (1999) |
| Nitrato chileno                | 21,08               | Hetz e Silva (1986)*  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 12,56               | Ferraro Junior (1999) |
| Super Fosfato Simples          | 9,79                | Ferraro Junior (1999) |
| Super Fosfato Triplo           | 22,11               | Ferraro Junior (1999) |
| Termofosfato                   | 3,77                | Ferraro Junior (1999) |
| Fosfato de rocha               | 0,63                | Ferraro Junior (1999) |
| DAP                            | 44,09               | Lockeretz (1980)      |
| K <sub>2</sub> O               | 6,70                | Ferraro Junior (1999) |
| KCl                            | 7,19                | Ferraro Junior (1999) |
| Sulfato de potássio            | 3,35                | Ferraro Junior (1999) |
| Sulfato de potássio e magnésio | 1,67                | Ferraro Junior (1999) |
| Calcário                       | 1,67                | Ferraro Junior (1999) |
| Casca                          | 1,24                | Composição**          |
| Cinza                          | 1,18                | Composição**          |
| Lama de cal                    | 2,88                | Composição**          |
| Biossólido                     | 3,17                | Composição**          |

\* Citado por Hetz et al. (1994).

\*\* Determinado pela composição usando-se os índices energéticos contidos em Pellizzi (1992) e Ferraro Jr (1999).

**Anexo B – Índices energéticos dos fertilizantes formulados.**

| <b>Formulações</b> | <b>MJ kg<sup>-1</sup></b> |
|--------------------|---------------------------|
| 00-18-06           | 2,66                      |
| 00-20-10           | 3,18                      |
| 00-24-12           | 3,82                      |
| 00-30-15           | 4,77                      |
| 04-20-20           | 6,81                      |
| 04-24-12           | 6,78                      |
| 04-30-10           | 7,40                      |
| 04-30-16           | 7,80                      |
| 05-20-10           | 6,88                      |
| 05-25-25           | 8,52                      |
| 06-30-10           | 8,88                      |
| 08-28-16           | 10,51                     |
| 08-30-20           | 11,03                     |
| 15-05-10           | 12,40                     |
| 18-06-09           | 14,68                     |
| 18-06-12           | 14,88                     |
| 20-00-10           | 15,47                     |
| 20-00-20           | 16,14                     |
| 20-07-20           | 17,02                     |
| 30-00-20           | 23,54                     |

Obs: Determinados através dos índices de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O de Ferraro Junior (1999)

**Anexo C – Índices energéticos de outros insumos.**

| <b>Insumos</b>      | <b>Energia contida</b>        | <b>Fonte</b>           |
|---------------------|-------------------------------|------------------------|
| Muda de eucalipto   | 0,77 MJ unidade <sup>-1</sup> | Oliveira Junior (2005) |
| Cereais e forragens | 10,50 MJ kg <sup>-1</sup>     | Pellizzi (1992)        |

**Anexo D – Índices energéticos para defensivos agrícolas.**

| <b>Defensivos</b> | <b>MJ kg<sup>-1</sup></b> | <b>Fonte</b>         |
|-------------------|---------------------------|----------------------|
| Herbicida         | 254,57                    | Pimentel (1980)      |
| Inseticida        | 184,71                    | Pimentel (1980)      |
| Fungicida         | 97,13                     | Pimentel (1980)      |
| MCPA              | 0,13                      | Fluck & Baird (1982) |
| Diuron            | 274,62                    | Fluck & Baird (1982) |
| Atrazina          | 188,38                    | Fluck & Baird (1982) |
| Trifluralina      | 150,97                    | Fluck & Baird (1982) |
| Paraquat          | 459,60                    | Fluck & Baird (1982) |
| 2,4 – D           | 87,04                     | Fluck & Baird (1982) |
| 2,4,5 – T         | 135,06                    | Fluck & Baird (1982) |
| Dicamba           | 295,13                    | Fluck & Baird (1982) |
| Glifosate         | 454,20                    | Fluck & Baird (1982) |
| Diquat            | 400,18                    | Fluck & Baird (1982) |
| Captan            | 115,05                    | Fluck & Baird (1982) |
| Carbofuran        | 454,20                    | Fluck & Baird (1982) |

**Anexo E – Dados básicos do sistema da produção avaliado utilizados no modelo elaborado. Fonte: Suzano Papel e Celulose.**

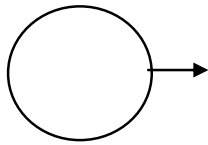
| Operação                        | Ajudantes |          | Máquinas  |       | Implementos   |       |           | Insumo |               |        |                       |
|---------------------------------|-----------|----------|-----------|-------|---|-------|-----------|--------|---------------|--------|-----------------------|
|                                 | Qtide     | Potência | Vida útil | Massa | Implemento  | Massa | Vida útil | CcO    | Tipo          | Qtde   | Unidade               |
|                                 |           | CV       | h         | kg    |   | kg    | h         |        |               |        |                       |
| Calagem                         | 0.00      | 75       | 12000     | 2380  | Calcaredora   | 1300  | 1200      | 0.830  | Calcário      | 1000.0 | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Aplicação de cinzas             | 0.00      | 75       | 12000     | 2380  | Calcaredora   | 1300  | 1200      | 0.727  | Cinzas        | 3000.0 | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Aplicação de biossólido         | 0.00      | 75       | 12000     | 2380  | Calcaredora   | 1300  | 1200      | 0.524  | lodo          | 7700.0 | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Subsolagem c/ ad. e herbicidasI | 0.00      | 75       | 12000     | 2380  | Subsolador com aplicador de fertilizante e pulverizador | 750   | 2000      | 0.500  | Scout         | 1.0    | L ha <sup>-1</sup>    |
|                                 |           |          |           |       |   |       |           |        | 06.30.10      | 260.0  | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Combate manual à formigas       | 0.40      |          |           |       |   |       |           | 1.000  | Isca          | 1.0    | unid ha <sup>-1</sup> |
| Plantio                         | 1.50      | 75       | 12000     | 2380  | Estrovenga*   | 760   | 3000      | 1.670  | Mudas         | 1790.0 | unid ha <sup>-1</sup> |
| Irrigação                       | 0.60      | 75       | 12000     | 2380  | Pipa*   | 300   | 5000      | 0.670  | Água          | 5556.0 | L ha <sup>-1</sup>    |
| Replântio                       | 1.50      | 75       | 12000     | 2380  | Estrovenga*   | 760   | 3000      | 1.670  | Mudas         | 55.0   | unid ha <sup>-1</sup> |
| Pulverização                    | 1.20      | 75       | 12000     | 2380  | Conceição*  | 700   | 2000      | 5.000  | Scout         | 3.0    | L ha <sup>-1</sup>    |
| Adubação de cobertura mecânica  | 0.00      | 75       | 12000     | 2380  | Adubadora área total ou filete contínuo                 | 1000  | 1500      | 0.830  | 14-00-15      | 150.0  | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Pulverização                    | 0.00      | 75       | 12000     | 2380  | Pulverizador  | 1200  | 5000      | 5.000  | Scout         | 1.8    | L ha <sup>-1</sup>    |
| Adubação de cobertura mecânica  | 0.00      | 110      | 10000     | 6070  | Adubadora área total ou filete contínuo                 | 1000  | 1500      | 0.830  | KCl           | 150.0  | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Pulverização                    | 0.00      | 75       | 12000     | 2380  | Pulverizador  | 1200  | 5000      | 5.000  | Scout         | 1.8    | L ha <sup>-1</sup>    |
| Adubação de cobertura mecânica  | 0.00      | 110      | 10000     | 6070  | Adubadora área total ou filete contínuo                 | 1000  | 1500      | 0.830  | 14-00-15 óleo | 250.0  | kg ha <sup>-1</sup>   |
| Colheita                        | 7.33      | 183      | 30000     | 19500 |   |       |           | 0.055  | lubrificante  | 22.79  | L ha <sup>-1</sup>    |

\* Nomes populares.

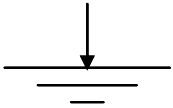


## Anexo F – Símbolos da linguagem energética.

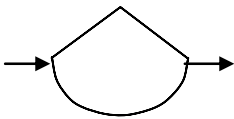
Traduzido e adaptado de Brown et al. (1995).



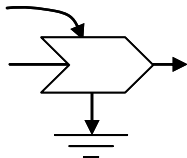
**Fonte de energia externa** — fornece fluxo de energia de fora do sistema



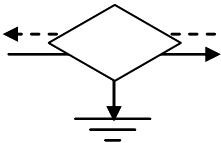
**Dreno** — drena a energia degradada após transformação ou realização de trabalho



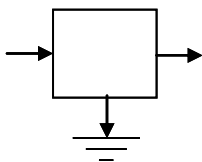
**Estoque de energia** — estoca e fornece fluxos de energia



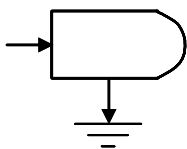
**Interação de energia** — requer duas ou mais formas de energia para produzir um fluxo de energia de alta qualidade



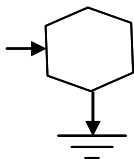
**Transação energia x dinheiro** — fluxo de dinheiro em troca de energia



**Propósitos gerais** — para qualquer sub-unidade necessária, é rotulado para indicar uso.



**Unidade produtora** — converte e concentra energia solar, auto-sustentável; detalhes podem ser mostrados no interior do símbolo.



**Unidade consumidora** — utiliza energia de alta qualidade, auto-sustentável; detalhes podem ser mostrados no interior do símbolo.

## Anexo G – Introdução á metodologia de emergia

Nesse anexo, baseado e adaptado de Odum (1996) são abordados os aspectos básicos da energia em sistemas para mostrar como o trabalho da natureza e sociedade podem ser avaliados em uma base comum (emergia) de tal forma a selecionar alternativas que obtiveram sucesso.

### 1. Introdução a sistemas de energia

As estruturas e estoques que operam o mundo (fatores antropogênicos e ambientais) são mantidos contra ação da segunda lei da termodinâmica nos insumos utilizados na manutenção das atividades demandadas. Maximizando os produtos e serviços para crescimento e manutenção parece ser um princípio de estratégia de auto-organização como mostrado por Alfred Lotka como o Princípio da Potência Máxima (*Maximum Power Principle*).

### 2. Hierarquia energética

A auto-organização desenvolve uma rede de transformações de energia em uma série. Na Figura 3.2 é chamada atenção para uma típica rede de energia transformando os componentes como a discutida na Figura 3.1. Da esquerda para a direita a quantidade total de energia diminui, mas a qualidade aumenta (no sentido de que mais transformações de energia são requeridas na formação). Uma vez que os fluxos de energia convergem em cada passo para gerar fluxos de energia menores no passo seguinte, é uma hierarquia energética. Energia decresce da esquerda para a direita, mas a energia transformada aumenta sua habilidade de reforçar outras unidades do sistema. Uma vez que todos os processos conhecidos podem ser organizados uns com os outros em redes seriadas como a da Figura 3.2, a hierarquia de energia parece ser a lei universal. Como exemplos de cadeias de energia têm-se organismos, ecossistemas, economias e processos terrestres.

Trabalho é definido aqui como a energia disponível degradada em uma transformação de energia. Uma vez que muitos joules de energia disponível na esquerda são requeridos para fazer as sucessivas transformações para formar os poucos joules de energia disponível na direita, é

quase inválido usar joules de uma forma de energia como equivalente a joules de outra forma para fins de avaliar contribuições (MARTINEZ-ALIER, 1987; ODUM, 1996). Todavia, podemos expressar cada tipo de energia disponível em unidades de um tipo de energia disponível.

### 3. Emergia

A emergia avalia o trabalho previamente realizado para se obter um produto ou serviço. Emergia é a medida de energia usada no passado e assim difere da medida de energia no presente. A unidade de emergia (uso de energia disponível no passado) é em emjoules para distinguir dos joules usados para medir a energia disponível no presente. Scienceman descreve emergia como a memória da emergia (ODUM, 1986; ODUM, 1996; SCIENCEMAN, 1987 e SCIENCEMAN et al., 1997). A síntese de um livro sobre os conceitos de emergia está disponível (ODUM et al., 1998). Algumas definições estão sintetizadas na Tabela G.1

Tabela G.1. Emergia e Definições relacionadas (Adaptado de ODUM, 1996)

| Termo              | Conceito  |
|--------------------|---|
| Energia disponível | Energia potencial capaz de realizar trabalho e de ser degradada no processo. (Unidades: quilocalorias, joules, BTUs, etc.)                              |
| Energia útil       | Energia disponível usada para aumentar o sistema de produção e eficiência (unidades: joules, quilocalorias disponíveis, etc.)                           |
| Potência           | Fluxo de energia útil por unidade de tempo (unidades: joules por tempo)   |
| Emergia            | Energia disponível de um tipo previamente requerida direta e indiretamente para obter um produto ou serviço (unidades: emjoules, emquilocalorias, etc.) |
| Empotência         | Fluxo de emergia por unidade de tempo (unidades: emjoules por unidade de tempo)   |
| Trabalho           | Um processo de transformação de energia que resulta numa mudança de concentração ou forma de energia.   |
| Transformidade     | Emergia por unidade de energia disponível de um tipo (emjoule por joule)  |
| Energia Solar      | Energia solar requerida direta e indiretamente para fazer um produto ou serviço (unidades: emjoule solar)   |

Há um tipo diferente de energia para cada tipo de energia disponível. Por exemplo: energia solar é em unidades de solar emjoules, energia de carvão é em unidades de emjoules de carvão, e energia elétrica em unidades de emjoules de eletricidade. Não há energia degradada (energia sem capacidade de realizar trabalho). Como energia, energia é medida em relação ao nível de referência. Uma vez que a energia solar é a mais difusa e de menor valor, na maioria das avaliações tem-se expressado em unidades de energia solar (sej = solar emjoules).

#### 4. UEV (unit energia value)

A UEV, chamada transformidade quando relacionada por joules, é definida com a energia (emjoules) de um tipo de energia disponível requerida direta e indiretamente (através das etapas demandadas) para gerar um joule de energia de outro tipo. Transformidade é a razão de energia para a energia disponível. Com as unidades sej  $J^{-1}$ , a transformidade não é uma razão adimensional. Dez formas distintas de calcular a transformidade foram sugeridas (ODUM, 1996). A forma mais comum é avaliar o sistema no qual o item de interesse é o produto. A hierarquia de energia da biosfera começa com a abundante, porém diluída energia solar. A taxa global anual de energia foi calculada como a soma da energia solar, das marés e a geológica (*deep heat*) contribuindo as transformações superficiais expressadas em energia solar.

#### 5 Energia e Matéria

Fluxos e estoques de matéria contêm energia disponível e energia. Transformações que concentram matéria requerem insumos de energia. Por exemplo, energia por massa de chumbo aumenta com a concentração de chumbo (ODUM et al., 1998). Para propósitos práticos de se calcular energia, é conveniente desenvolver tabelas de energia específica (energia por massa). McGrane (1998) avaliou materiais do ciclo terrestre. Ciclos biogeoquímicos tradicionais deveriam ser redesenhados para refletir a posição deles na hierarquia energética de acordo com energia específica deles. Ciclos de materiais convergem para centros hierárquicos e divergem novamente quando retornam mais diluídos ao ambiente. A contribuição de energia da terra pode

ser analisada como a taxa de erosão vezes a transformidade do substrato geológico, que foi formado previamente.

## 6 Emergia e informação

Informação, incluindo informação aprendida e genética apresentam transportadores de energia, tais como papel, memória de computador, ondas sonoras, que podem ser dispersos, depreciado e apresentar erros. Informação tem emergia de acordo com a emergia requerida para gerá-la e mantê-la. Informação é algo que requer menos emergia para copiar do que para gerar uma nova. Embora copiar seja barato, manter a informação sem erro requer uma população de duplicatas e um processo cíclico de duplicação, dispersão, seleção e duplicação novamente. Alguém precisa reorganizar os milhares de diagramas de ciclo de vida animal e vegetal, histórias ensinadas em cursos de biologia em ordem das transformidades das etapas e avaliar a base emergética deles. A transformidade da informação extraída (semente, código ou planta da casa) é maior que a mesma informação contida no sistema em que ela está operando (planta, computador, casa). Valores são maiores onde a informação é amplamente dividida (estratégia genética da vida, Bíblia). A emergia de gerar nova informação dos precursores pode ser enorme, como na evolução.

## 7 Emergia e sistemas de agregação

A análise de emergia tem que adaptar a como os sistemas são agregados no diagrama sistêmico. Brown e Herendeen (1996) comparando metodologias de emergia e energia apresentam algumas regras:

1. Todas as fontes de emergia são contabilizadas para avaliar o processo de obtenção de um produto;
2. Co-produtos apresentam toda a emergia contabilizada também para si;
3. Em divisões (*splits*) o percentual de material em cada via é considerado; e
4. Emergia não pode ser contada duas vezes (por exemplo, em retroalimentações ou quando co-produtos são utilizados juntos).

Há certa indefinição sobre quando se considerar co-produto ou quando se considerar divisões em sistemas produtivos. Por exemplo, na produção de ovos, galinhas além de botá-los defecam que pode ter fins fertilizantes para horticultura, se ao produzir 10 ovos a galinha excrete 100 g de fezes, tendo consumido 1E5 sej, o conteúdo de energia atribuído será 1000 sej ovo<sup>-1</sup> e 100 sej g<sup>-1</sup> de fezes. Isso ocorre, pois são tratados como co-produtos, pois embora ambos apresentem nitrogênio na composição, as formas aminoácido e amônia, para ovos e fezes, respectivamente apresentam diferentes níveis de estruturação, logo não podem ser comparados. Numa hipótese em que ovo e fezes de galinha entrassem na composição de um dado produto, apenas a maior contribuição seria considerada para se evitar a dupla contagem.

Para o caso de divisões, pode-se citar o exemplo de madeira colhida para a produção de celulose e papel, embora toda a biomassa tenha a mesma composição galhos são destinados à geração de energia e tronco é destinado à obtenção de celulose, se 5% da biomassa representa os galhos, 5% do total de energia demandada é atribuída aos galhos e 95% ao tronco. Nesse caso, não há problema de dupla contagem.

Na síntese de energia o produto final sempre apresentará maior conteúdo de energia, ao passo que em análises de energia etapas intermediárias podem apresentar maior conteúdo (retroalimentação) o que viola a regra 4 da energia. A forma em que a energia procede não conserva o fluxo de energia, o que é um ponto de discordância à análise de energia.

Co-produtos são desenhados como uma ramificação tem o fluxo de produtos dividido em dois fluxos do mesmo tipo (mesma transformidade) dividindo energia e energia pelos mesmos percentuais. Co-produtos são somados se recombinados. Por exemplo, uma corrente pode se dividir à medida que flui por uma ilha, recombinando-se do outro lado. Subprodutos, desenhados com linhas separadas a partir da unidade de transformação, têm a mesma empotência, mas seus fluxos de energia são diferentes, bem como suas transformidades. Exemplos são carne e lã da criação de ovelhas, galhos e folhas na produção florestal. Cuidado deve ser tomado para não se contar duplamente a mesma energia caso esses fluxos se recombinem.

## Anexo H – Determinação da base emergética global

Esse anexo é baseado em Odum (2000).

A Figura H.1 apresenta a esquematização das contribuições de energia das energias (solar, geotérmica e das marés) componentes da biosfera.

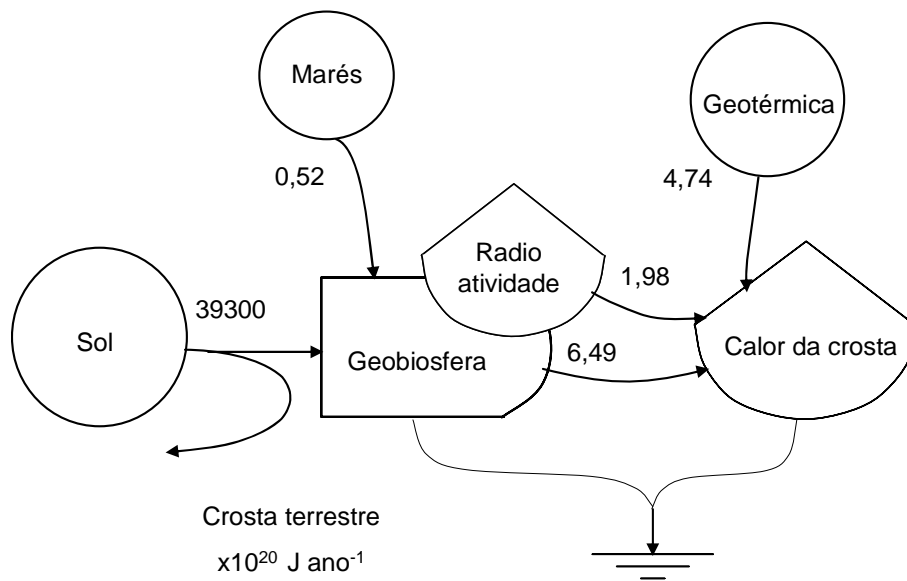


Figura H.1 – Esquema da contribuição natural à biosfera

A soma da energia solar com a energia das marés equivale a energia do calor gerado pelos processos da superfície. Como a energia é calculada multiplicando-se o conteúdo de exergia (J) pela transformidade do produto ou serviço. Assim, tem-se Equação H.1, que relaciona as proporções entre as transformidades da energia de marés e da geotérmica.

$$39330 \text{ E20 J ano}^{-1} * 1 \text{ sej J}^{-1} + 0,52 \text{ E20 J ano}^{-1} * \text{Trt} = 6,49 \text{ E20 J ano}^{-1} * \text{Trh}$$

(Eq. H.1)

Onde:

39330 E20 é o fluxo de energia emitido pelo sol ( $\text{J ano}^{-1}$ );

1 é a UEV da energia solar por convenção ( $\text{sej J}^{-1}$ );

0,52 E20 é o fluxo de energia das marés ( $\text{J ano}^{-1}$ );

$Trt$  é a UEV das marés (sej  $J^{-1}$ );

$6,49 E20$  é o fluxo de energia do calor da geobiosfera ( $J \text{ ano}^{-1}$ );

$Trh$  é a UEV do calor gerado pela geobiosfera (sej  $J^{-1}$ ).

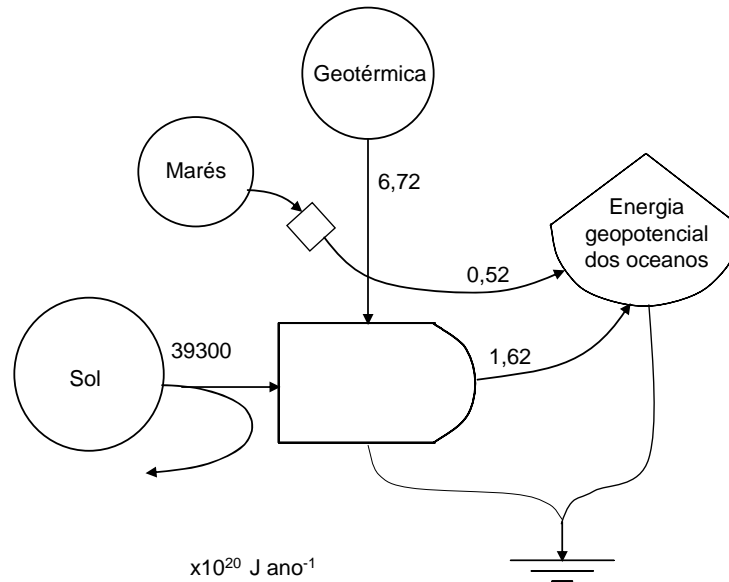


Figura H.2 – Contribuição da energia solar, geotérmica e das marés para a energia geopotencial contida nos oceanos

Considerando-se que a soma da energia solar, da energia das marés e da energia geotérmica resulta na energia geopotencial dos oceanos, tem-se a Equação H.2.

$$(39300 E20 * 1,0) + (0,52 E20 * Trt) + (6,72E20 * Trh) = (2,14E20 * Trt)$$

(Eq. H.2)

Onde:

$39330 E20$  é o fluxo de energia emitido pelo sol ( $J \text{ ano}^{-1}$ );

$1$  é a UEV da energia solar por convenção (sej  $J^{-1}$ );

$0,52 E20$  é o fluxo de energia das marés ( $J \text{ ano}^{-1}$ );

$Trt$  é a UEV das marés (sej  $J^{-1}$ );

$6,49 E20$  é o fluxo de energia do calor da geobiosfera ( $J \text{ ano}^{-1}$ );

$Trh$  é a UEV do calor gerado pela geobiosfera (sej  $J^{-1}$ );



$2,14E20$  é a soma dos fluxos de das marés ( $0,52E20$  sej ano<sup>-1</sup>) e do sol ( $1,62E20$  sej ano<sup>-1</sup>) que compõe a energia geopotencial dos oceanos.

Para se obter os valores para as UEVs subtrai-se a Equação H.1 da Equação H.2, obtendo-se a Equação H.3:

$$(6,72E20 * Trh) = (2,14E20 * Trt) - (6,49E20 * Trh)$$

(Eq. H.3)

Assim a UEV para maré encontrada é (Equação H.4).

$$Trt = 6,17 Trh \quad \text{(Eq.H.4)}$$

Substituindo-se Eq. H.4 na Eq. H.1, obtém-se a transformidade do calor da crosta (Equação H.5).

$$Trh = 11981 \text{ sej } J^{-1} \quad \text{(Eq. H.5)}$$

Com o valor para o calor emitido pela crosta terrestre, determina-se a UEV das marés (Equação H.6)

$$Trt = 6,17 * 11945 = 73923 \text{ sej } J^{-1} \quad \text{(Eq. H.6)}$$

O resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela H.1, o que relata a chamada nova base (ODUM, 2001) emergética global, que substituiu a antiga cujo valor era  $9,42E24$  sej ano<sup>-1</sup>.

Tabela H.1 – Emergia de insumos da biosfera

| <b>Nota</b> | <b>Fluxo</b>                 | <b>UEV<br/>sej J<sup>-1</sup></b> | <b>Fluxo de emergia<br/>E24 sej ano<sup>-1</sup></b> |
|-------------|------------------------------|-----------------------------------|--|
| 1           | Energia solar absorvida      | 1                                 | 3,93   |
| 2           | Fontes de calor da crosta    | 1,20E4                            | 8,06   |
| 3           | Energia absorvida das marés  | 7,37E4                            | 3,83   |
|             | Energia total anual da Terra | -                                 | 15,83  |

Notas:

sej J<sup>-1</sup> = joules de emergia solar por joule. \* fluxo de emergia anual global vezes a transformidade

1. Transformidade é 1 por definição; 3,93E24 J ano<sup>-1</sup> é baseada na constante solar 2 cal cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>, 70% de absorção e 1,27E14 m<sup>2</sup> seção transversal face ao Sol.

2. Transformidade da equação de emergia para o calor da crosta resolvida na seção anterior; calor liberado pela radioatividade da crosta 1,98E20 J ano<sup>-1</sup> mais 4,74E20 J ano<sup>-1</sup> do fluxo de calor da manta (SCLATER et al., 1980).

3. Transformidade da equação de emergia geopotencial de oceanos na seção anterior. Fluxo de emergia 0,52E20 J ano<sup>-1</sup> (MILLER, 1966).