

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE
BIOMASSA DE EUCALIPTO E DE CAPIM ELEFANTE
PARA ENERGIA**

LAURENT ROGER MARIE QUÉNO

ORIENTADOR: Prof. Dr. ÁLVARO NOGUEIRA DE SOUZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: PPG EFL. DM-132/09

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE
EUCALIPTO E DE CAPIM ELEFANTE PARA ENERGIA**

LAURENT ROGER MARIE QUÉNO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLO-
GIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM ENGENHARIA FLORESTAL.**

APROVADO POR:

Prof. Dr. ÁLVARO NOGUEIRA DE SOUZA
(Departamento de Engenharia Florestal – UnB)
(Orientador)

Prof. Dr. HUMBERTO ÂNGELO
(Departamento de Engenharia Florestal – UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Dr. LAÉRCIO COUTO,
(Faculty of Forestry - University of Toronto)
(Examinador Externo)

Prof. Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE
(Departamento de Engenharia Florestal – UnB)
(Suplente)

BRASÍLIA/DF, 21 DE DEZEMBRO DE 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

QUÉNO, LAURENT ROGER MARIE

Viabilidade Econômica da Produção de Biomassa de Eucalipto e de Capim Elefante para Energia [Distrito Federal]. 2009

xiii, 64p., 210 x 297 mm (EFL/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Economia florestal

2. Biomassa - Energia

3. Manejo florestal

4. Eucalipto

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

QUÉNO, L. R. M. (2009). Viabilidade econômica da produção de biomassa de eucalipto e de capim elefante para energia. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Publicação PPG EFL. DM-132/09, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 64p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Laurent Roger Marie Quéno

TÍTULO: Viabilidade Econômica da Produção de Biomassa de Eucalipto e de Capim Elefante para Energia.

GRAU: Mestre

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Laurent Roger Marie Quéno
RN37 Qd40 Lt20 Anápolis city, 2ª etapa
75094-420 Anápolis - GO – Brasil

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de ter realizado este mestrado na Universidade de Brasília e pelo privilégio de ter tido excelentes professores, sempre dispostos a responder as perguntas sobre vários assuntos acadêmicos ou profissionais.

À minha esposa, Maira, pelo suporte nos momentos difíceis e também pelo apoio para vencer todos os obstáculos.

Especialmente ao Álvaro Nogueira de Souza, meu professor e orientador, pela disponibilidade, pelo encorajamento e pelo exemplo de dedicação à sua vocação como professor, e também pela amizade que se formou durante esses anos.

Ao professor Joaquim Carlos Gonzalez, que me acolheu na UnB e facilitou minha integração nesta universidade.

Ao professor Laércio Couto, que disponibilizou os dados da RENABIO, dando corpo a esta dissertação.

À Universidade de Brasília e ao Departamento de Engenharia Florestal, pelo privilégio de fazer este curso.

RESUMO

VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE EUCALIPTO E DE CAPIM ELEFANTE PARA ENERGIA

Autor: Laurent Roger Marie Quéno

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, dezembro de 2009

A produção de energia oriunda de culturas lignocelulósicas é prevista para crescer nos próximos anos no Brasil. O eucalipto já é amplamente cultivado, e beneficia de uma sólida experiência. O capim-elefante faz figura de *outsider*, que tem tudo a provar, mesmo se sua produção em quantidade de matéria seca atinge níveis recordes. Objetivou-se, neste trabalho: (i) determinar a produção da biomassa do eucalipto (*Eucalyptus* sp.), em diferentes tratamentos silviculturais, e do capim-elefante (*Pennisetum* sp.); (ii) estabelecer o custo de produção da unidade energética gerada pela biomassa do eucalipto e pela biomassa do capim-elefante; (iii) aplicar uma análise de sensibilidade para verificar as influências de fatores como a silvicultura do eucalipto, a produção volumétrica de cada espécie, o custo da terra e a taxa de juros nos custos de produção analisados. Para o eucalipto foram usados os dados fornecidos pela RENABIO e coletados nos plantios de um clone de um híbrido (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) da ArcelorMittal BioEnergia, em Itamarandiba (MG), na região do Jequitinhonha. Para o capim-elefante foram usados os dados encontrados na literatura. Foi calculado o custo médio de produção do gigajoule da biomassa pronta para ser entregue à usina termoelétrica. Foi demonstrado que o tratamento do eucalipto em plantio adensado e em curtíssima rotação de dois anos, com reforma do povoamento a cada seis anos, teve um custo médio de produção (CMPr) superior ao sistema convencional com rotação a cada seis anos e reforma aos 18. Observou-se também que o eucalipto apresenta, em média, um CMPr de 4,41 R\$/Gj, inferior ao do capim-elefante, que em média é de 5,44 R\$/Gj, mesmo com a capacidade que o último tem de produção anual superior de matéria seca. O capim-elefante tem a possibilidade de competir com o eucalipto quando um conjunto de condições se forma como taxa de desconto igual ou superior a 8% a.a., preço da terra elevado e volume do capim-elefante igual ou acima de 35 toneladas de matéria seca por hectare por ano.

Palavras-chave: *Eucalyptus* sp., *Pennisetum* sp., Biomassa, Energia, Custo Médio de Produção.

ABSTRACT

ECONOMIC VIABILITY OF PRODUCTION BIOMASS OF EUCALYPTUS AND ELEPHANT GRASS FOR ENERGY

Author: Laurent Roger Marie Quéno

Supervisor: Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, December of 2009

The production of energy from lignocellulosic cultures is expected to rise in a soon future in Brazil. The eucalyptus is already widely cultivated and benefits a solid experience. The elephant grass is figure of outsider and has everything to prove even if its production in terms of dry matter volume reaches record levels. The objectives of this work were: (i) to determine the biomass production of eucalyptus (*Eucalyptus* sp.) in different silviculture treatments and elephant grass (*Pennisetum* sp.); (ii) to establish the unit energy cost generated from eucalyptus biomass and from elephant grass biomass; (iii) to apply a sensitivity analysis to verify the influences of factors such as the silviculture of eucalyptus, production volume of each species, the cost of land and the interest rate. For the eucalyptus were used data provided by RENABIO and collected from the stands of a hybrid clone (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) of the “ArcelorMittal BioEnergy” located at Itamarandiba (MG) from the Jequitinhonha region. For the elephant grass, were used the data found in the literature. The average cost for the biomass production has been calculated in Gigajoule ready for delivery to thermoelectric plant. It was been shown that the treatment of eucalyptus in very short rotation of 2 years with reform of stand every 6 years has a average cost of production higher than the traditional treatment of short rotation of 6 years with reform only at the age of 18. It was also observed that eucalyptus has an Average Cost of Production on average of 4,41 R\$/Gj, lower than the elephant grass which is on average of 5,44 R\$/Gj, which however has a higher annual capacity of dry matter production. The elephant grass has the possibility to compete with eucalyptus when a set of conditions is met: discount rate higher than or equal to 8%, High price of land, and elephant grass high volume production, greater than or equal to 35 tonnes of dry matter per hectare and year.

Keywords: *Eucalyptus* sp., *Pennisetum* sp., Biomass, Energy, Average Production Cost

RÉSUMÉ

VIABILITÉ ÉCONOMIQUE DE LA PRODUCTION DE BIOMASSE DE L'EUCALYPTUS ET DU NAPIER POUR FOURNIR DE L'ÉNERGIE.

Auteur: Laurent Roger Marie Quéno

Orientateur: Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, Decembre 2009

La production d'énergie à partir de cultures lignocellulosiques est appelée à prendre son essor dans les années qui viennent au Brésil. L'eucalyptus est déjà amplement cultivé et bénéficie d'une solide expérience. Le napier quant à lui fait figure d'outsider et a tout à prouver même si sa production en terme de volume de matière sèche atteint des niveaux records. Ce travail a eu pour objectifs : (i) déterminer le niveau de production de la biomasse de l'eucalyptus (*Eucalyptus* sp.) en différents traitements silviculturaux e du napier (*Pennisetum* sp.); (ii) établir le coût de production de l'unité énergétique générée par la biomasse de l'eucalyptus et par la biomasse du napier; et (iii) réaliser une Analyse de Sensibilité afin de vérifier l'influence de différents facteurs comme la sylviculture de l'eucalyptus, la production volumétrique de chaque espèce, le taux d'intérêt et le coût de la terre. Pour l'eucalyptus, les données utilisées ont été fournies par RENABIO et collectées à partir des peuplements d'eucalyptus hybrid (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) de l'« ArcelorMittal BioEnergia» implantés à Itamarandiba (MG) dans la région de la Jequitinhonha. Pour le napier, les données utilisées proviennent de la littérature. Le Coût Moyen de Production du Gigajoule de la biomasse prête à être livrée en centrale thermoélectrique a été calculé. Il a été démontré que le traitement de l'eucalyptus en très courte rotation de 2 ans avec réforme du peuplement chaque 6 ans a un CMPr supérieur au traitement traditionnel de courte rotation de 6 ans avec réforme seulement à 18 ans. Il a été observé aussi que l'eucalyptus a un CMPr en moyenne de 4,41 R\$/Gj, inférieur à celui du napier qui est en moyenne de 5,44 R\$/Gj, ce dernier produisant pourtant une quantité de matière sèche annuelle supérieure. Le napier est compétitif avec l'eucalyptus seulement quand un ensemble de facteurs sont réunis: taux d'intérêt supérieur ou égal à 8%, coût de la terre élevé, e volume important de production du napier, supérieur ou égal à 35 tonnes de matière sèche par hectare et par an.

Mots-clé : *Eucalyptus* sp., *Pennisetum* sp., Biomasse, Energie, Coût Moyen de Production

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA	4
2.1.1 No Mundo.....	4
2.1.1.1 As talhadias de curta rotação (TCR)/ <i>short-rotation woody crops</i> (SRWC).....	4
2.1.1.2 As culturas energéticas herbáceas/ <i>herbaceous energy crops</i> (HEC)	7
2.1.2 No Brasil.....	9
2.2 A PRODUÇÃO DE BIOMASSA PELO EUCALIPTO	11
2.2.1 O potencial de produção do eucalipto	11
2.2.2 A densidade básica da madeira.....	12
2.2.2.1 Obtenção da densidade básica e da biomassa total	12
2.2.2.2 Variação da densidade básica.....	13
2.2.3 O potencial energético da biomassa do eucalipto.....	15
2.2.3.1 Cálculo do poder calorífico	16
2.2.3.2 A energia realmente disponível: O poder calorífico líquido	17
2.2.4 Silvicultura adaptada para a produção sustentável de biomassa	20
2.3 A PRODUÇÃO DE BIOMASSA DO CAPIM-ELEFANTE	21
2.3.1 Características gerais do capim-elefante	21
2.3.2 O cultivo do capim-elefante	23
2.3.3 A produção de biomassa do capim-elefante	24
2.3.4 O potencial energético do capim-elefante	26
2.4 CUSTOS DE PRODUÇÃO DE BIOMASSAS PARA ENERGIA NO MUNDO.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
3.2 DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA DO EUCALIPTO	30
3.2.1 Obtenção da produção volumétrica	30
3.2.2 Obtenção da densidade básica a partir de discos.....	32
3.2.3 Poder calorífico da biomassa de eucalipto	33
3.2.4 Potencial energético do eucalipto	34
3.3 DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA DO CAPIM-ELEFANTE	35
3.3.1 A produção de matéria seca por hectare do capim-elefante	35
3.3.2 Potencial energético da biomassa do capim-elefante	36
3.4 ANÁLISE DO CUSTO DE PRODUÇÃO DA BIOMASSA.....	37
3.4.1 O método do custo médio de produção	37

3.4.2	Custo médio de produção do eucalipto	38
3.4.2.1	Construção da tabela de custo de produção da biomassa do eucalipto	38
3.4.2.2	O custo da terra	39
3.4.3	Custo médio de produção do capim-elefante	40
3.4.3.1	Construção da tabela de custo de produção do capim-elefante.....	40
3.4.3.2	Custo da unidade energética do capim-elefante	44
3.4.4	Análise de sensibilidade	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	RESULTADOS	45
4.1.1	Custo de produção da unidade energética da biomassa de eucalipto	45
4.1.2	Custo de produção da unidade energética da biomassa de capim-elefante	47
4.1.3	Comparação eucalipto/capim-elefante	49
4.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
4.3	PROPOSTAS DE PESQUISAS FUTURAS	52
5	CONCLUSÕES.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Projeção do consumo de energia em milhões de tEP (tonelada Equivalente Petróleo) proveniente da biomassa, principalmente oriunda de madeira.....	5
Tabela 2.2 - Produções atuais constatadas de algumas culturas energéticas no Reino Unido.....	6
Tabela 2.3 - Projeções das características dos povoamentos clonais de <i>E. grandis</i> com uma precipitação anual de 1.300 mm.....	14
Tabela 2.4 - Peso total da matéria seca da parte aérea de <i>E. grandis</i> em função da idade e do incremento médio anual em toneladas (IMA).....	15
Tabela 2.5 - Extração anual de nutrientes do capim-elefante.....	24
Tabela 2.6 - Produção de matéria seca sobre dois tipos de solos e com três cortes num período de 22 meses	25
Tabela 2.7 - Custos de produção da biomassa para energia e outras fontes no Brasil e no mundo.....	29
Tabela 3.1 - Produção volumétrica com casca acumulada para cada tratamento em diferentes idades.....	31
Tabela 3.2 - Resultado da densidade básica (Db) encontrada em cada tratamento.....	32
Tabela 3.3 - Biomassa seca com casca em tonelada por hectare produzida em cada tratamento.....	32
Tabela 3.4 - Poder calorífico da madeira de eucalipto em função da densidade de plantio	34
Tabela 3.5 - Produções em incremento médio anual dos diferentes tratamentos do eucaliptos.....	39
Tabela 3.6 - Custos por hectare do capim-elefante BNF (zero N/ha)	41
Tabela 4.1 - Exemplos de análise de sensibilidade do custo de produção da biomassa do eucalipto	45
Tabela 4.2 - Custo médio de produção (CMP _r) da unidade energética (R\$/Gj) de biomassa de eucalipto em função do tratamento, da taxa de desconto e do preço da terra.....	46
Tabela 4.3 - Variação do CMP _r da unidade energética (R\$/Gj) para o capim-elefante.....	48
Tabela 4.4 - Tabela comparativa do custo médio de produção (R\$/Gj) do eucalipto com o do capim-elefante	49

Tabela 4.5 – Resultado do teste de Newman Keuls comparando o CMPr das culturas energética de capim elefante e de eucalipto	50
Tabela 4.6 - Produção de biomassa seca com casca: peso total (toneladas/ha) e Incremento Médio Anual da matéria seca.....	53

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Conjunto de ciências que permitem a melhora na produção dos TCR..... 7
- Figura 3.1 - Produção de biomassa em função do espaçamento do plantio em
incremento médio anual de matéria seca com casca.33

1 INTRODUÇÃO

Hoje, a procura de fontes energéticas alternativas ao petróleo, devido à sua escassez, ao seu alto preço e ao problema de emissão de CO₂ na atmosfera, favorecendo o aquecimento global, tornou-se uma questão crucial para o futuro do desenvolvimento econômico do mundo.

Entre as soluções possíveis, a biomassa se destaca como oportunidade a médio e longo prazo, especialmente no Brasil, que dispõe de terra em quantidade suficiente para alcançar uma produção significativa. A biomassa vegetal pode definir-se como toda produção de matéria oriunda de plantas transformável em fonte de energia. Efetivamente, a biomassa é uma forma indireta de energia solar (Brito et al., 1979).

A energia solar é estocada pelas plantas pelos processos bioquímicos da fotossíntese, na forma de carboidratos. Estes carboidratos podem ser transformados em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, que, por sua vez, serão queimados para produzir outros tipos de energia, entre elas a energia elétrica (Goldemberg, 2009).

A fotossíntese permite a captura de dióxido de carbono, o principal agente do efeito estufa, e a liberação de oxigênio, o que possibilita a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a contenção do aquecimento global. Assim, a biomassa tem todas as vantagens para ser uma fonte sustentável de energia e, com isso, proporcionar um grande desenvolvimento futuro.

A biomassa sempre foi uma importante fonte de energia. Até poucas gerações atrás a lenha foi, mesmo em países desenvolvidos, a principal fonte de energia para a vida cotidiana, para cozinhar e para aquecer residências.

Na verdade, a lenha ainda é um recurso imprescindível para muitas populações em regiões subdesenvolvidas ao redor do mundo. A FAO estima que 2 bilhões de pessoas dependam da madeira na forma de lenha ou carvão vegetal para sua sobrevivência (Trossero, 2002). De um total de 4 bilhões de m³ de madeira consumidos anualmente no mundo, cerca de 55% são utilizados na forma de lenha ou de carvão, diretamente como fonte de energia

para o cozimento dos alimentos ou aquecimento de residências, principalmente nos países em desenvolvimento (Hall, 2003)

Hoje, graças à inovação tecnológica, a biomassa pode ser transformada em energia elétrica por meio de vários processos, especialmente a gaseificação. As termoelétricas podem ser abastecidas por uma biomassa cultivada em grande escala, proveniente de plantas selecionadas com grande potencial de produção. Entre elas, no Brasil, o eucalipto e o capim-elefante figuram como os vegetais com maior potencial.

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.), segundo Urquiaga (2008), tem a capacidade de produzir de 30 a 40 toneladas de matéria seca por hectare por ano, em região com chuvas bem distribuídas e abundantes ao longo do ano.

A biomassa das duas espécies compete na produção de energia em projetos ao redor do mundo. A produtividade do capim-elefante, em termo de quantidade de matéria seca acumulada por hectare por ano, pode superar a do eucalipto. A acumulação de carbono pelo capim-elefante pode alcançar um nível muito alto, da ordem de 12,5 toneladas de carbono fixado por hectare por ano, enquanto o nível do eucalipto fica em torno de 10 toneladas (Yoshida et al., 2008).

A questão relacionada às espécies com potencial para fontes de matéria-prima para geração de energia elétrica é qual delas apresenta o menor custo de produção. O capim-elefante, mesmo tendo a capacidade de produzir anualmente uma quantidade elevada de biomassa, apresenta dificuldades na sua conversão em energia, em função da grande umidade presente na sua composição. O eucalipto tem a vantagem de ter um custo de implantação diluído em vários anos de produção, devido à sua capacidade de gerar brotações vigorosas quando conduzido em talhadias.

Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo geral demonstrar a viabilidade econômica da biomassa do eucalipto, em condições de cerrado, para a produção de energia, comparando-a com a do capim-elefante.

Especificamente, pretendeu-se:

- 1 – determinar a produção de biomassa do eucalipto em diferentes rotações, assim como a do capim-elefante;
- 2 – estabelecer o custo de produção da unidade energética gerada pelas biomassas do eucalipto e do capim-elefante; e
- 3 – verificar as influências de fatores como: produção volumétrica de cada espécie, custo da terra, taxa de juros e densidade de plantio do eucalipto nos custos de produção.

Hipótese

O custo de produção da unidade energética a partir da biomassa do eucalipto é competitivo em relação ao custo de produção da mesma unidade oriunda da biomassa do capim-elefante.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA

2.1.1 No Mundo

2.1.1.1 As talhadias de curta rotação (TCR)/ *short-rotation woody crops* (SRWC)

Há três décadas, a produção de biomassa energética a partir de talhadias conduzidas em curtas rotações foi o objeto de inúmeros estudos e pesquisas. Geralmente nos países de clima temperado as talhadias de curta rotação ou *short-rotation woody crops* (SRWC) usam espécies ou híbridos (clones) do gênero *Populus*, *Salix*, *Alnus*, *Betula*, *Liquidambar*, *Platanus*, *Acacia*, *Paulownia* e *Eucalyptus* e são cortadas em ciclos cujas durações variam de 3 a 15 anos (Hall, 2003; Senelwa, 1999). A produção de matéria seca pode atingir, anualmente, de 8 a 16 toneladas por hectare em clima temperado. Com esse nível de produção, uma área de 8.000 hectares é suficiente para abastecer uma usina com ciclo a vapor, fornecendo 20 MW (Coombs, 2002).

Enquanto a silvicultura de “alto fuste” tenta se aproximar do ciclo natural das florestas, com o objetivo de produzir uma madeira de alto valor unitário, as plantações energéticas se resumem no plantio em alta densidade para uma rápida ocupação do espaço, o uso de uma silvicultura intensiva para obter uma alta taxa de crescimento e a colheita em ciclos plurianuais aproveitando a capacidade natural de rebrotação dessas espécies folhosas (Mead, 2005; Dickmann, 2006).

Na verdade, o sistema de condução florestal em talhadia é muito antigo. Antes da revolução industrial e a aparição do carvão fóssil, muitas florestas na Europa foram tratadas em talhadias, com ciclo de corte de 10 a 12 anos, com a finalidade de fornecer lenha e carvão (Anderson et al., 2002).

Hoje a luta contra o aquecimento global é uma das prioridades na política de vários países ocidentais. A França, por exemplo, fixou o objetivo de reduzir a emissão de gases de efeito estufa, em média, em 3 % ao ano, de 1990 até 2050, o que representa uma divisão por

quatro das emissões. Nesse contexto, as energias renováveis como a biomassa florestal terão uma importância crescente na matriz energética de vários países, como mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Projeção do consumo de energia em milhões de tEP (tonelada Equivalente Petróleo) proveniente da biomassa, principalmente oriunda de madeira

Região	Consumo de biomassa em MtEP				
	Atual			Previsto	
	1970	1980	2005	2020	2030
África	87	131	177	219	240
Ásia – Pacífico	259	279	278	302	300
Europa	60	70	89	272	291
America Latina e Caribe	70	88	105	123	133
America do Norte	45	64	65	86	101
Oriente - Médio e Ásia central	11	7	6	8	10
Mundo	532	639	720	1010	1075

Fonte: FAO (2009).

As talhadias de curta rotação (TCR) vêm, então, ganhando espaço e atenção em muitos países, especialmente na Europa, para cumprir várias finalidades ambientais, além de produzir uma energia limpa de gases de efeito estufa, como filtração e ciclagem do lodo de esgoto, proteção de áreas de captação, sistemas agroflorestais, recuperação de áreas degradadas e contenção do avanço de erosões (Guidi et al., 2005; Clinch et al., 2009).

A biomassa produzida é geralmente picada na forma de cavaco, para ser queimada em caldeira. Na Europa Ocidental, as áreas disponíveis são limitadas para plantios em grande escala de TCR. Por isso as experiências atuais são ainda de porte limitado e com o objetivo de aquecer um prédio coletivo, como um hospital ou uma escola. O grande potencial de implantação de TCR é provavelmente na Europa do centro e do leste, com uma disponibilidade de terra da ordem de 44 milhões de hectares (Van Dam et al, 2007).

Para os projetos de grande porte (usinas produzindo 30MW), geralmente a biomassa do TCR é associada a outras fontes de biomassa florestal, resíduos de exploração florestal, resíduos da indústria madeireira e reciclagem de produtos madeireiros. Por exemplo, uma usina atualmente em construção na França, na cidade de Tavaux, pelas empresas Solvay e Dalkia, vai produzir 30 MW, utilizando 270.000 toneladas de biomassa (85% MS) por ano, proveniente de 70 % de resíduos florestais, 20 % de resíduos da indústria madeireira, 3%

de resíduos vegetais urbanos, 4% de reciclagem de madeira usada (ex: palette) e 3 % de biomassa de TCR. Pode parecer pouco o espaço concedido à madeira proveniente de TCR, mas isso já representa 10.000 toneladas colhidas numa área total de pelo menos 2.000 hectares de TCR, repartidos entre vários pequenos produtores rurais (Tami, 2009).

No Reino Unido, o governo tem o projeto de aumentar sensivelmente as áreas para as culturas energéticas para a produção de bioethanol, de biodiesel e de biomassa a partir de *Miscanthus* e de TCR à base de *Willow* (*Salix* sp.) de *poplar* (*Populus* sp.). O potencial de produção atual das TCR fica em torno de 8 a 12 toneladas de matéria seca/ha.ano, já que a previsão de mudança climática se concretizará pelo aumento das temperaturas médias mais favoráveis à produção vegetal e com a maior duração do período vegetativo. O aumento do teor de CO₂ na atmosfera será também favorável à atividade fotossintética. Foi estimado que, para o *Populus trichocarpa*, o aumento da produção do TCR pode ser de 24% (Aylott et al., 2009). O objetivo atual do governo no Reino Unido é produzir, em curto prazo, 1.500 MW com a biomassa de culturas energéticas e de TCR, utilizando para isso uma área de 125.000 ha. Mas estuda-se a possibilidade de fixar, para essas produções, até 5,4% dos 18,5 Mha de terras agrícolas (Aylott et al. 2008).

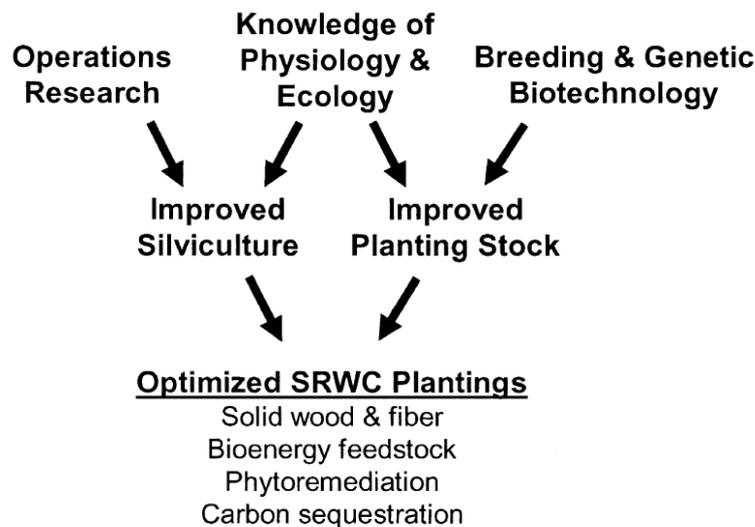
A Tabela 2.2 mostra o potencial energético atual de diferentes plantas nas condições climáticas britânicas. As possibilidades de melhora genética do *poplar* e do *willow* são consideráveis, pelo fato de existir uma grande variabilidade natural entre os indivíduos. O alto potencial de até 25 toneladas de matéria seca/ha.ano foi demonstrado especialmente para cultivares do gênero *Populus spp.* (Rae et al., 2004; Ceulemans et al., 1999).

Tabela 2.2 - Produções atuais constatadas de algumas culturas energéticas no Reino Unido

Cultura	Produção Matéria Seca (t./ha.ano)	Energia Contida (Gj/tonelada)
<i>Populus</i> (Poplar)	8 a 10	18,5
<i>Salix</i> (Willow)	10 a 15	18,5
<i>Miscanthus</i>	10 a 13	17,0
<i>Panicum virgatum</i> (Switchgrass)	9 a 10	18,3
<i>Phalaris arundinacea</i> (Reed canary Grass)	5 a 15	16,2

Fonte: Natural Environment Research Council – UK (2009).

Dickmann (2006) mostrou que o progresso na tecnologia do TCR depende da interação entre as pesquisas em silvicultura, fisiologia vegetal, ecologia e melhoramento genético (Figura 2.1). Esses esforços conjuntos permitirão às talhadas energéticas suprir uma parte crescente da energia necessária no mundo. O melhoramento genético é um eixo essencial. Em 2004, o genoma do *Populus trichocarpa* foi o primeiro genoma de árvore a ser sequenciado. Isso vai proporcionar avanços na produtividade energética dos plantios e na resistência a insetos, herbicidas e doenças.



Fonte: adaptado de Dickmann (2006).

Figura 2.1 - Conjunto de ciências que permitem a melhora na produção dos TCR.

2.1.1.2 As culturas energéticas herbáceas/*herbaceous energy crops (HEC)*

As espécies herbáceas que apresentam potencial para produção anual de grande quantidade de biomassa têm as seguintes características fisiológicas: alta eficiência no processo de conversão da energia solar pela fotossíntese, uso eficiente da água no solo e necessidade limitada de nutrientes, graças à sua capacidade de retranslocação destes nas raízes no final do ciclo vegetativo anual. Essas herbáceas de alta produtividade são geralmente de ciclo fotossintético C_4 e provêm de regiões tropicais ou subtropicais. O mecanismo C_4 é aproximadamente 40% mais eficiente para a captação de carbono que o mecanismo C_3 das gramíneas mais comuns de clima temperado (Samson et al., 2005).

Essas espécies herbáceas perenes têm grande potencial de produção de biomassa, pelo fato de ter um sistema radicular extenso e profundo, permitindo o forte crescimento quando as condições de temperatura, de radiação solar e de umidade são favoráveis. Um exemplo é a gramínea *Panicum virgatum*, chamada *switchgrass*, originada das grandes planícies e pradarias nos Estados Unidos. Ela atinge plena produção somente no terceiro ano, quando seu sistema radicular está suficientemente desenvolvido. O *switchgrass* demonstra capacidade de produção num patamar que pode ultrapassar o milho em anos com condições culturais excepcionais. Em média, em função dos cultivares, esse capim produz de 15 a 22 toneladas de matéria seca anual e com uma grande regularidade (McLaughlin et al., 2009).

Um eixo importante de pesquisa sobre as herbáceas potencialmente energéticas concerne à melhoria da eficiência da adubação em nitrogênio. Estudando o ciclo vital do *switchgrass*, foi descoberto que o teor de nitrogênio declina rapidamente após as primeiras geadas, por causa da retranslocação do nutriente das partes aéreas em direção às raízes. Assim, uma colheita realizada nesse ponto permite uma economia de fertilização. Em vez de colocar anualmente 200 a 300 kg de N por hectare, somente 40 a 50 kg são suficientes para alcançar uma alta e duradoura produção.

Outra grande vantagem de herbáceas como o *switchgrass* é o grande estoque de carbono acumulado profundamente no solo, graças ao seu sistema radicular, que pode atingir 2,5 metros de profundidade. Assim, até 80 % da biomassa da planta fica em baixo da terra, o que faz do *switchgrass* um grande sequestrador de carbono orgânico no solo. Liebig et al. (2005) demonstraram que as raízes produzem 6,7 toneladas de biomassa no solo por ano e por hectare, biomassa esta que entra no ciclo subterrâneo do carbono, que tende a acumular-se nas diferentes culturas anuais.

Várias espécies de herbáceas perenes com alto potencial de geração de energia são atualmente experimentadas, especialmente nos países do Hemisfério Norte (EUA, Canadá, UK, Alemanha, França, etc.). Fala-se de espécies como *Miscanthus*, *Andropogon gerardii*, *Calamovilfa longifolia* e *Spartina pectinata* (McLaughlin et al., 2009). Além da produção de energia limpa de gases de efeito estufa, o *Myscanthus* acumula o carbono no solo. Em torno de 18 % do carbono da biomassa subterrânea se acumula anualmente no solo,

representando de 0,93 até 1,63 toneladas de carbono por hectare por ano (Clifton-Brown et al., 2004).

O principal desafio dessas culturas energéticas para serem matérias-primas utilizadas na geração de eletricidade em escala industrial é reduzir os níveis de cálcio, dos resíduos clorados, de silício, de nitrogênio e de umidade. Um teor alto de nitrogênio na biomassa, além do custo da adubação, pode gerar um poluente, o óxido de nitrogênio (NOx), durante o processo de queima. Mas o problema mais sério na biomassa das herbáceas vem do alto teor de cálcio e de cloreto, que se transformam em elementos corrosivos das instalações durante o processo de combustão. O teor de silício pode também ser problemático pelo seu poder abrasivo no processo de adensamento e de transformação em pellets; já o teor de umidade representa um grande problema na conservação da biomassa, pelo alto custo em energia para sua secagem (McLaughlin et al., 2009).

2.1.2 No Brasil

O surgimento de uma silvicultura de florestas plantadas no Brasil, no início do século XX, deve-se à necessidade de fornecer uma grande quantidade de lenha usada como energia para as locomotivas da Companhia Paulista de Estrada de Ferro (Andrade, 1939).

Nessa época, com a extensão das estradas de ferro, precisava-se de uma fonte ampla e segura de lenha com qualidades energéticas. A escassez de lenha nativa para atender à demanda impulsionou a empresa a buscar novas opções. O eucalipto foi testado com sucesso, devido ao seu rápido crescimento e ao bom potencial térmico de sua madeira, assim como para produção de postes e dormentes.

O grande silvicultor brasileiro Edmundo Navarro de Andrade destacou-se nessa época. Desde então, o Brasil passou a plantar florestas de eucalipto de rápido crescimento, que se revelou também, mais adiante, uma matéria-prima excelente para atender à demanda por carvão vegetal e celulose (Neiva, 1939 e Sampaio, 1961: in Andrade, 1961).

Segundo a ANEEL (2008), a biomassa, em todas as formas consideradas, ocupa no Brasil a posição de segunda principal fonte de energia, superada apenas pelo petróleo e seus derivados. Ela participa com, aproximadamente, 31,1 % na matriz energética.

Especificamente, a biomassa transformada em energia elétrica ocupa a mesma posição entre as fontes de energia elétrica de origem interna, e responde por 3,7% da oferta. Só foi superada pela energia hidrelétrica, responsável pela produção de 77,4% da oferta total, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2008.

De acordo com a ANEEL (2008), há 302 termelétricas movidas à biomassa no País, que correspondem a um total de 5,7 mil MW (megawatts) instalados. Do total de usinas relacionadas, 13 são abastecidas por licor negro (resíduo da celulose) com potência total de 944 MW; 27 por madeira (232 MW); três por biogás (45 MW); quatro por casca de arroz (21 MW) e 252 por bagaço de cana (4 mil MW). Uma das características desses empreendimentos é o seu pequeno porte, com potência de até 60 MW, o que favorece a instalação nas proximidades dos centros de consumo e suprimento.

A produção de energia elétrica a partir da biomassa está caminhando hoje em duas direções:

- 1) Geração em escala média/grande (dezenas de MW) com ciclos a vapor. Tecnologias totalmente comerciais e amplamente empregadas nas agroindústrias da cana-de-açúcar ou celulose.

A eficiência na conversão para energia elétrica é fortemente dependente do nível de pressão utilizado e do uso de cogeração total ou parcial. Caldeiras a 20 bar, em cogeração pura com pressão de escape a 1,5 bar (como na maioria das usinas de açúcar, hoje), atingem 7% de conversão; a 80 bar, com a condensação, podem atingir 30%.

Os equipamentos são produzidos no Brasil, com exceção de alguns itens de instrumentação e componentes de turbinas. Caldeiras para madeira, cavacos e bagaço de cana são produzidas com tecnologias modernas. Estes equipamentos são os mais utilizados no mundo para essa faixa de capacidade. Por exemplo, em Uganda, uma usina funciona produzindo 50MW com plantio de *E. grandis*, numa área de 26.000 hectares (Buchholz et al., 2007). Avanços (sempre limitados em eficiência de conversão pela natureza do processo) têm sido continuamente incorporados a esses equipamentos, sendo hoje um conjunto de tecnologias dominado no Brasil em todos os seus aspectos, incluindo controle ambiental.

2) Geração em escala média/grande (dezenas de MW) com ciclos de gaseificação/turbinas a gás. Estas tecnologias começam a ser comercializadas hoje, no mundo.

Na gaseificação, por meio de reações termoquímicas que envolvem vapor quente e oxigênio, é possível transformar o combustível sólido em gás (mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio). Este gás pode ser utilizado em motores de combustão interna e em turbinas para geração de eletricidade. Além disso, é possível remover da mistura os componentes químicos que prejudicam o meio ambiente e a saúde humana – o que transforma a gaseificação em um processo limpo.

A expectativa é de que a gaseificação possa gerar energia a custos equivalentes aos dos ciclos convencionais a vapor, mas com muito maior eficiência, ou seja, até duas vezes mais eficientes (Macedo 2001).

2.2 A PRODUÇÃO DE BIOMASSA PELO EUCALIPTO

2.2.1 O potencial de produção do eucalipto

Vários autores demonstraram que as espécies do gênero *Eucalyptus* apresentam elevada eficiência nutricional em razão de sua maior capacidade de retranslocação de nutrientes em relação a outras espécies florestais. A retranslocação de nutrientes, principalmente N, P e K, consiste na migração dos elementos químicos das folhas para os galhos, pouco antes de a queda delas (Costa et al., 2005). Assim, o eucalipto consegue aproveitar a disponibilidade de nutrientes do sítio em produção maciça de madeira.

Foi também comprovado que a produção de biomassa na madeira por indivíduo de *E. camaldulensis* cresce com a adubação e com espaçamentos maiores, devido à maior disponibilidade de nutrientes, água e luz para cada árvore (Oliveira Neto, 2003). Foi observado aumento da relação raiz/parte aérea na produção de biomassa com a diminuição do nível de adubação e também com a degradação da fertilidade do sítio de plantio.

Reis (1985) demonstrou que a quantidade de biomassa alocada na madeira (caule + galhos) em relação à biomassa total representa 61% em sítio bom, e somente 46% em sítios mais pobres. Este comportamento da maior alocação proporcional de fotoassimilados para as

raízes em sítios pobres pode ser considerado uma estratégia da espécie na procura de água e nutrientes.

Sturion (1988) mostrou que a densidade básica da madeira de *E. viminalis* não foi influenciada pelo espaçamento, mas sim pelo aumento da idade de corte de quatro para sete anos. Em média, a densidade aumentou 8%. A madeira mais densa proporciona maior poder calorífico por unidade de volume; a madeira de sete anos forneceu maior quantidade de calor, por unidade de volume, que aquela de quatro anos.

Isto significa que para comparar a quantidade de biomassa produzida ao longo do tempo deve-se considerar tanto o volume como a densidade, pois a produtividade em peso e, conseqüentemente, em energia depende dessas duas variáveis.

2.2.2 A densidade básica da madeira

O modo mais comum de se referir à densidade da madeira, e da biomassa em geral, é “densidade básica” (Db). Ela expressa a relação entre o peso absolutamente seco e o volume saturado da madeira. Conhecendo-se a densidade básica da madeira do eucalipto e o volume produzido, poderá ser feita uma estimativa da quantidade de matéria seca produzida.

2.2.2.1 Obtenção da densidade básica e da biomassa total

Para determinação da densidade básica da madeira de uma árvore, podem ser usados os métodos destrutivo ou não destrutivo (Scolforo et al., 2004). No método destrutivo, discos de 5 cm de espessura são retirados a cada 1,5 m, da árvore abatida. Os discos frescos, mesmos após alguns dias de corte, são caracterizados por um teor de umidade próximo do ponto de saturação. Se não for o caso, os discos são imersos até chegar ao ponto de peso estável. Nesse ponto de saturação, cada disco é pesado e seu volume calculado através do método de deslocamento de água. Após isso, os discos são colocados em estufa à temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até atingir peso constante, para poder medir seu peso seco.

Para o cálculo da densidade básica é utilizada a expressão:

$$Db = \frac{Ms}{Vv}$$

em que

Db = densidade básica (g/cm^3);

V_v = volume dos corpos-de-prova verdes (cm^3); e

Ms = massa dos corpos-de-prova absolutamente secos (g).

Para a árvore, a densidade média ponderada é calculada utilizando-se o volume da seção entre um disco como fator de ponderação, a partir da equação de Smalian:

$$DbMA = \frac{\left[\frac{d_0 + d_{1,5}}{2} \right] * V_1 + \left[\frac{d_{1,5} + d_3}{2} \right] * V_2 + \dots + \left[\frac{d_{[(n \times 1,5) - 1,5]} + d_{(n \times 1,5)}}{2} \right] * V_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n}$$

em que

$DbMA$ = densidade média ponderada da árvore;

$d_0, d_{1,5}, \dots, d_{n \times 1,5}$ = densidade a diferentes alturas na árvore; e

e V_1, V_2, \dots, V_n = volume das seções entre os discos.

Para obtenção do peso seco da árvore, multiplica-se seu volume por sua densidade básica média (DMA). Então o peso seco da árvore será:

$$P \text{ seco} = \text{volume verde (ou saturado)} \times dB$$

E a quantidade de matéria seca produzida por hectare será:

$$\text{Matéria seca/ha (em toneladas/ha)} = \text{Volume verde/ha (em } m^3/\text{ha)} \times Db \text{ (em tonelada}/m^3)$$

2.2.2.2 Variação da densidade básica

Segundo Ferreira et al. (1979), é comumente aceito o fato de que o tecido meristemático cambial passa por mudanças em função da idade da árvore. Essas mudanças irão dar origem a variações na madeira produzida, em cada idade. Como consequência, a madeira dos primeiros anos de vida é significativamente diferente da madeira nas idades mais avançadas. A madeira dos estágios iniciais de crescimento é denominada madeira juvenil e a outra, madeira adulta.

Os autores mostraram que para uma mesma classe de idade a densidade básica está relacionada ao diâmetro das árvores. Segundo eles, *Eucalyptus grandis* de cinco – sete anos tinham a densidade básica de sua madeira crescendo conjuntamente com o diâmetro dos indivíduos.

Pereira et al. (2004) mostraram que a produção de biomassa do *E. grandis* está diretamente relacionada ao espaço disponível para cada árvore e à quantidade de radiação solar global disponível em cada ciclo. Eles conseguiram estabelecer um modelo de estimativa do peso total de matéria seca do tronco em função da energia solar disponível, do tempo de ciclo e da área ocupada por cada árvore.

O acréscimo da densidade básica com a idade foi medido para o *Eucalyptus grandis* com vistas à quantificação do potencial de armazenamento de CO₂ da atmosfera. Segundo Maestri (2004), a densidade básica da madeira de eucalipto cresce até a idade de oito anos (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Projeções das características dos povoamentos clonais de *E. grandis* com uma precipitação anual de 1.300 mm

Idade (ano)	DAP (cm)	Altura Média (m)	Altura Dominante (m)	Densidade Básica (kg/m ³)
2	9,4	11,9	12,9	457
3	11,6	15,4	16,6	457
4	13,2	18,3	19,7	464
5	14,5	20,8	22,3	490
6	15,5	22,9	24,6	519
7	16,4	24,7	26,7	548
8	17,1	26,3	28,4	579
9	17,8	27,7	30,0	580
10	18,3	29,0	31,4	580

Fonte: adaptado de Maestri (2004).

Os incrementos gravimétricos anuais (da densidade básica) sugerem, para o espaçamento estudado (3,0 m x 2,0 m), que o corte do *E. grandis* com idade inferior a quatro anos não seria a melhor opção, já que a curva de crescimento em peso sofre uma grande inclinação positiva a partir do quarto ano. Esses aumentos do crescimento gravimétrico podem ser parcialmente explicados devido ao provável aumento na densidade da madeira a partir do quinto ano, além, evidentemente, do crescimento volumétrico (Maestri, 2004).

Os dados obtidos por Belotte (1980), citado por Balloni et al. (1980), mostram a importância de se fazer um inventário florestal criterioso de forma a acompanhar o crescimento da floresta não só do ponto de vista dendrométrico, mas também quanto ao crescimento gravimétrico (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Peso total da matéria seca da parte aérea de *E. grandis* em função da idade e do incremento médio anual em toneladas (IMA)

Idade (anos)	Peso * (t/ha)	IMA (t/ha/ano)
1	12,1	12,1
2	39,4	19,7
3	64,3	21,4
4	108,4	27,1
5	149,1	29,8
6	289,6	48,3
7	224,2	32,0

Fonte: adaptado de Belotte (1980) ;* Peso dos ramos, folhas e caule de 1.500 árvores/ha.

O Incremento Médio Anual em peso seco do *E. grandis* atingido neste exemplo, aos seis anos, ultrapassa as 40 toneladas, o que justifica a comparação com o capim-elefante.

2.2.3 O potencial energético da biomassa do eucalipto

O potencial energético do eucalipto e sua rentabilidade econômica foram demonstrados por vários autores. Por exemplo, Rocha et al. (1993), trabalhando com cavacos de eucalipto, a uma umidade média de 49,47%, constataram que para atingir a mesma energia obtida na queima de 1 m³ deste material seriam necessários 72 kg de óleo combustível, 220,39 kWh de energia elétrica, ou ainda 105 kg de carvão mineral. Utilizando valores da época, a alternativa de utilizar a madeira de eucalipto mostrava-se vantajosa, uma vez que a situação estudada foi de uma empresa que obtinha a madeira como resíduo da exploração principal.

A partir do conceito de poder calorífico líquido volumétrico (PCLV), apresentado por Brito (1983), Lima (2003) avaliou o equivalente de produção energética dos plantios de reposição florestal em *E. grandis* e *E. paniculata* na região do Médio Tietê, em São Paulo, e mostrou o grande potencial energético, especialmente do *E. paniculata*.

Foi possível afirmar que a espécie *E. paniculata* é superior a *E. grandis* em 60,87% para a variável densidade básica (densidade a granel, respectivamente 740 e 460 kg/st de lenha) e para o incremento médio anual (IMA), em 25%, o que resulta em um índice de superioridade geral do *E. paniculata* de 101,09% em produtividade florestal (mássica) e energética (Lima, 2003).

Esse fato mostra a importância da escolha certa da espécie e do clone de *Eucalyptus* para a produção de energia. A quantidade de energia disponível por unidade de superfície de uma floresta plantada pode variar muito, como mostra o exemplo de Lima (2003). Comparando duas árvores, aquela com madeira de maior densidade básica tem mais carbono por unidade volumétrica. Esse carbono será a principal fonte de energia durante a queima. Para o mesmo volume, uma madeira de maior densidade básica produzirá mais energia.

Por isso que em todo projeto industrial, visando à implantação de uma floresta de eucalipto com vocação energética, deve-se preocupar em selecionar genótipos que sejam produtivos tanto em volumes de madeira quanto em maiores valores de densidade básica.

2.2.3.1 Cálculo do poder calorífico

Neste estudo, o poder calorífico superior será utilizado para ter uma unidade comparável com a do capim-elefante. O poder calorífico expressa a capacidade de geração de energia de um combustível durante a sua combustão. Sua unidade de medida é quilocaloria (kcal) por quilo (kg) ou calorias (cal) por grama (g) de combustível.

O poder calorífico é geralmente calculado com uma bomba calorimétrica. A fórmula utilizada para o seu cálculo é :

$$P_{cs} = \frac{C \cdot \Delta t - (c1 + c2)}{m}$$

em que

P_{cs} = poder calorífico superior, em cal/g ou kcal/kg;

C = constante do calorímetro = 2461,98 (obtido através de inúmeros testes para calibração);

Δt = diferença de leituras dos termômetros (antes e após queima - temperatura final - temperatura inicial);

$C1$ = correção em calorias para cada centímetro de fio queimado = 2,3 cal/cm (dados médios de laboratório indicam que geralmente todo o fio é queimado, gerando cerca de 20 calorias);

$C2$ = correção para calorias para titulação em ácido nítrico, em ml (dados médios de laboratório indicam 3 ml para carvão e 2 ml para madeira); e

m = massa inicial em gramas.

2.2.3.2 A energia realmente disponível: O poder calorífico líquido

Brito (1993) desenvolveu uma metodologia para estimar o potencial de energia disponibilizada pela biomassa de eucalipto para uma indústria. Esse potencial de energia disponível vai depender do poder calorífico produzido da madeira, do teor de umidade e da densidade dessa madeira.

O poder calorífico pode expressar-se como poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico superior (PCS), dependendo se for computada a energia necessária na vaporização da água formada no processo de combustão da madeira.

Como foi constatado anteriormente, o PCS é geralmente obtido pelo calorímetro. O PCI é calculado em função do PCS. A relação entre PCI e PCS depende da quantidade de hidrogênio elementar da madeira.

$$PCI = PCS - 600 * (9H / 100)$$

em que

PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg);

PCS = poder calorífico superior (kcal/kg); e

H = teor de hidrogênio (%).

Com um teor médio de hidrogênio em torno de 6%, em base seca, a equação precedente se escreve como a seguir:

$$PCI = PCS - 324$$

Os valores dos PCS variam segundo a madeira, dependendo de sua composição química. Se for considerado um PCS de 4.300 a 4.500 kcal/kg , tem-se um PCI de 4.000 a 4.200 kcal/kg.

O teor de umidade tem forte influência na eficiência calorífica da madeira, considerando que é preciso 600 kcal para evaporar 1 kg de água contida nela. O teor de umidade em uma madeira recentemente cortada é de aproximadamente 60%, e para se chegar a uma umidade chamada umidade de equilíbrio, em torno de 15%, é necessário um processo de secagem durante vários meses ao ar livre. Este teor de umidade de equilíbrio depende da espécie, da UR e da temperatura ambiente.

Daí, Brito (1993) desenvolveu a noção de poder calorífico líquido, que expressa o poder calorífico da madeira na umidade em que ela se encontra.

$$PCL_u = [PCI * (100 - u) / 100] - 6 * u$$

em que

PCL_u = poder calorífico líquido à unidade “u” (kcal/kg);

PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg); e

u = teor de umidade da madeira – base úmida (%).

O poder calorífico volumétrico expressa a quantidade de energia a ser liberada por unidade de volume sólido (kcal/m³). Quanto mais denso for o material, maior será a concentração de constituintes na madeira, e maior será o PCV.

Como visto anteriormente, a densidade básica expressa a relação entre peso absolutamente seco e volume saturado da madeira. Deve ser ressaltado que nos processos industriais a madeira não é queimada completamente seca, mas com um teor de umidade que pode variar de 10 a 20% em função da estação, que influencia a higrometria ambiente das condições de colheita, secagem e estocagem.

Determina-se então a densidade atual, que leva em consideração a retração volumétrica da madeira que ocorre durante sua secagem abaixo de 30% de umidade.

$$DAT_u = (Db * 10.000) / [(100 - u) * (100 - R_u)]$$

em que

DAT_u = densidade atual à umidade “ u ” (kg/m³);

Db = densidade básica da madeira (kg/m³);

u = teor de umidade (%); e

R_u = retração volumétrica esperada da madeira a umidade “ u ” (%).

Estimativas de retração volumétrica da madeira em função de seu teor de umidade:

Teor de umidade (%) :	30	↔	Retração volumétrica(%) :	0
	25			2
	20			4
	15			5
	10			8

Para ilustrar essa noção de poder calorífico líquido, a seguir tem-se um exemplo de cálculo da produção florestal em unidades energéticas:

Conhecendo o teor de umidade da madeira, o cálculo do poder calorífico líquido volumétrico é dado pela correlação entre poder calorífico líquido e densidade básica:

$$PCVL_u = PCL_u \times DAT_u$$

em que

$PCVL_u$ = poder calorífico líquido volumétrico à umidade « u ».

A produção energética de um povoamento é o produto de sua produção volumétrica (m³/ha) com seu PCVL (kcal/m³).

$$Y = P * PCVL_u$$

Considerando uma madeira de *Eucalyptus urophylla*

Poder calorífico inferior (PCI) = 4000 kcal /kg;

Teor de umidade (u) = 15 %;

Densidade básica aos 6 anos (Db) = 520 kg/m³;

Produção volumétrica média aos 6 anos (P) = 40 m³/ha.ano;

$PCL_{15} = [4.000 * (100-15)/100] - (6 * 15) = 3310$ kcal/kg;

$DAT_{15} = (520 * 10.000)/[(100 - 15) * (100 - 5)] = 644$ kg/m³;

$PCVL_{15} = 3310 * 644 = 2.131.640$ kcal/m³; e

$Y = 40 * 2.131.640 = 85,27 * 10^6$ kcal/ha/ano.

Esse método de cálculo da energia disponibilizada pela biomassa do eucalipto não vai ser utilizado na fase seguinte deste estudo, por falta de dados comparáveis com os do capim-elefante. O valor do poder calorífico superior será a referência utilizada para estimar a energia disponibilizada pelas duas biomassas e para calcular o seu custo médio de produção.

2.2.4 Silvicultura adaptada para a produção sustentável de biomassa

Os espaçamentos, o trabalho adequado do solo para o plantio, a fertilização e a determinação da idade ótima de rotação são os diferentes fatores a considerar para atingir o alvo de uma produção de biomassa economicamente rentável e ambientalmente sustentável em longo prazo.

É importante ressaltar o risco de perda de fertilidade do solo num prazo médio com a extração intensiva de biomassa. A extração de todos os resíduos provoca diminuição do nível de Ca, Mg e P do solo, afetando negativamente a nutrição e o crescimento, e no final provocando maior mortalidade nas rotações seguintes (Poggiani et al., 1983).

Spangenberg et al. (1996) estudaram as perdas de nutrientes provocadas pela extração de madeira com casca de *Eucalyptus urograndis* com idade de quatro-cinco anos. Foi demonstrado que 65% de N, 54% de P, 76% de Ca, 57% de K, e 61% de Mg do estoque desses nutrientes da biomassa aérea são levados durante a exploração florestal. O problema principal acontece com o cálcio, pois 65 % do cálcio da biomassa é levado na casca. Isso fez com que os autores sugerissem que a casca seja deixada no sítio de exploração ou colocada de volta na forma de cinza, após a queima da lenha.

Mackensen et al. (2000) estimaram o custo da adubação necessária para manter um alto nível de produção em floresta industrial com rotações curtas. Uma extração excessiva de

minerais devido ao manejo florestal com altos impactos nos solos, favorecendo os processos erosivos e de lixiviação, traduz-se em aumento dos custos de implantação e, conseqüentemente, em diminuição notável da taxa interna de retorno, TIR, de 14 até 9%.

Por isso, o cultivo do eucalipto para produção de biomassa energética precisa da adoção de uma silvicultura que favoreça a renovação natural dos nutrientes (Merino, 2003). Paixão et al. (2006) confirmam que para um povoamento de seis anos de *E. grandis*, em Viçosa – MG, a maior quantidade de carbono é armazenada no tronco do eucalipto (81% da parte aérea), demonstrando que não há necessidade de extrair todos os resíduos de corte para produção de energia.

A influência de diferentes espaçamentos sobre a produção de biomassa varia com a espécie, a idade das plantas e a qualidade de sítio (Bernardo, 1995). Observou-se em povoamento de *E. grandis* que o tronco representava 33,4% da biomassa da parte aérea, enquanto folhas e galhos 64,18%, devendo-se ressaltar que aos sete anos somente o tronco contribui com 94,8% de toda a matéria seca (Bellote, 1979, citado por Rondon, 2002).

2.3 A PRODUÇÃO DE BIOMASSA DO CAPIM-ELEFANTE

2.3.1 Características gerais do capim-elefante

As referências bibliográficas sobre o capim-elefante são numerosas no Brasil, pelo fato de essa gramínea representar hoje uma fonte importante de alimento para a criação de gado, especialmente para a alimentação do rebanho produtor de leite.

O uso do capim-elefante na criação de gado permite o fornecimento de forragem verde mais tempo durante o ano, e com bom valor nutritivo. Ele pode ser facilmente aproveitado na forma de feno ou de silagem a serem utilizados no período seco do ano.

O capim-elefante é uma planta originária da África subtropical – Zimbábue (FAO, 2009), onde cresce às margens dos rios ou das florestas em solos férteis. Ele foi descoberto em 1905 pelo Coronel Napier. Seu uso espalhou-se por toda a África e na maioria dos países tropicais e subtropicais onde ele foi introduzido. A cultura chegou ao Brasil nos anos de 1920 e se encontra hoje adaptada às cinco regiões do país.

Sua descrição original data de 1827 (Tcacenco e Botrell, 1997), porém sofreu modificações ao longo do tempo. Atualmente, a espécie *Pennisetum purpureum* pertence à família *Poaceae*, subfamília *Panicoideae*, tribo: *Paniceae*, gênero: *Pennisetum* L. Rich e espécie: *P. purpureum*, Schumacher (G.R.I.N., 2009)

Como a cana-de-açúcar e outras gramíneas tropicais, o capim-elefante é uma planta de alta eficiência fotossintética, utilizando o mecanismo C4 de fixação do carbono. Esta característica permite às plantas crescer rapidamente, otimizando o uso da água do solo e da energia solar para produção de biomassa vegetal. Assim, o capim-elefante possui a capacidade de acumulação de grande quantidade de matéria seca com características qualitativas (porcentual elevado de fibras), o que indica potencial para produção de energia (Samson et al., 2005).

Kirchhof et al. (2001) demonstraram que a capacidade do capim-elefante produzir grande quantidade de matéria seca está também relacionada ao fato de ser uma planta que se beneficia da fixação biológica de nitrogênio (FBN).

Bactérias endófitas diazotróficas do gênero *Herbaspirillum* estão presentes nos tecidos das raízes, dos colmos e das folhas do capim-elefante e permitem o fornecimento de até 50% do nitrogênio necessário à planta (Morais et al., 2009).

O capim-elefante pode ser empregado também na recuperação de áreas degradadas, pelo fato de gerar uma grande quantidade de matéria orgânica a ser reciclada no solo. Nas discussões sobre o mercado futuro de carbono, a cultura do capim-elefante é citada como potencial de produzir energia limpa, sequestrando o carbono atmosférico (Boddey et al., 2004).

Segundo Lopes (2004), o capim-elefante apresenta vários cultivares, que podem ser divididos em cinco grupos, de acordo com a época de florescimento, pilosidade da planta, diâmetro do colmo, formato da touceira, largura da folha, número e tipo de perfilhos. Esses grupos são o Anão; o Cameroon, com as cultivares “Cameroon, Piracicaba, Vruckwona e Guaçu”; o Mercker; e o Napier, com as cultivares “Napier, Mineiro e Taiwan A-146”. Hoje existem também híbridos interespecies resultantes do cruzamento entre espécies de *Pennisetum*, principalmente *P. purpureum* e *P. glaucum* (*ex. americanum*).

2.3.2 O cultivo do capim-elefante

O capim-elefante é uma planta perene que acumula reservas na forma de carboidratos (amido) nos rizomas até o final do outono, o que favorece a sua persistência. A planta suporta cortes repetidos, pelo fato de as reservas acumuladas nos rizomas permitirem a emergência de novos brotos.

Os números de cortes anuais não devem ser excessivos, para não impedir o acúmulo de reservas nos rizomas. Cortes contínuos, em intervalos de 28 dias, reduzem o vigor das rebrotas até a completa exaustão das reservas (Vilela et al., 1997). No manejo da capineira para produção de forragem é aconselhado no máximo cinco cortes anuais. Plantas cortadas duas vezes por ano apresentam a mesma reserva nos rizomas que aquelas não cortadas (Diz et al., 1994).

Vilela (1997) mostrou que um ponto fundamental a ser considerado para determinar a época do corte é a época de plantio, por causa do fotoperíodo crítico. Este está relacionado com a produção de uma enzima que é responsável pela mudança da atividade da planta.

As atividades de crescimento compreendem o crescimento vegetativo e o crescimento reprodutivo. O comprimento do dia, por sua vez, é que determina o fotoperíodo, ou seja, uma quantidade de luz incidente. A partir do momento que há determinada quantidade de luz incidente, que é característica de cada planta, ocorre o fotoperíodo crítico, ou seja, muda de crescimento vegetativo para reprodutivo.

Neste ponto a planta estará mobilizada para o crescimento reprodutivo. O crescimento vegetativo é praticamente nulo, e isto ocorrerá independentemente de sua idade. Portanto, pode ocorrer a parada de crescimento da planta nova, com 10 a 20 cm de altura, para iniciar a produção de sementes (florescimento), ou fase de reprodução. Normalmente, esta fase ocorre de março a abril, em todas as regiões fisiográficas brasileiras. Recomenda-se, por esta razão, que o plantio seja feito em outubro. Os cortes são feitos quando a planta se encontra madura, com cerca de 3 metros de altura (corte em março, em torno de 150 dias de crescimento), e para a rebrota, em torno de 210 dias (corte em outubro).

Evidentemente, como toda cultura, a exploração da capineira é viável em longo prazo na condição de uma adubação adequada às exportações de minerais. Uma produção alta em termo de matéria seca corresponde à necessidade alta de adubação.

Lopes (2004) apresenta dados que mostram a importância da nutrição em nitrogênio e potássio da capineira (Tabela 2.5). Removendo pelo menos 12 kg de nitrogênio e 20 kg de potássio por tonelada de matéria seca produzida, a capineira vai precisar de uma forte adubação anual, podendo onerar os custos.

Tabela 2.5 - Extração anual de nutrientes do capim-elefante

Fonte	Prod. MS (t/ha.a)	Nutrientes Removidos (kg/ha.a)				
		N	P	K	Ca	Mg
Rodrigues e Rodrigues (1987)	27,7	332	70	554	105	69
Vicente-Chandler et al. (1974)	28,8	338	72	565	108	71
Média kg nutrientes removidos/t. MS capim-elefante	28,25	11,9	2,5	19,8	3,8	2,5

Fonte: adaptado de Lopes (2004).

Considerando esse fato, a Embrapa Agrobiologia desenvolveu pesquisas para obtenção de variedades de capim-elefante com alta capacidade de fixação de nitrogênio atmosférico graças à associação com bactérias simbióticas. O objetivo foi selecionar genótipos de capim-elefante que tenham produção elevada quando adubados com adequados níveis de nutrientes (PK e micronutrientes), mas sem a aplicação de N-fertilizante (Quesada et al., 2004).

2.3.3 A produção de biomassa do capim-elefante

Atualmente no Brasil duas linhas de pesquisa se definem em relação à produção de biomassa a partir do capim-elefante. Uma linha procura buscar genótipos do capim-elefante *Pennisetum purpureum* com grande eficiência de fixação do nitrogênio atmosférico devido à associação de bactérias simbióticas com a planta. Os objetivos são utilizar o mínimo de energia fóssil, abaixar o custo de produção, usando menos adubação em nitrogênio, e produzir uma biomassa com maior relação C:N, considerando que o poder calorífico da biomassa é diretamente ligado ao teor do carbono que é principalmente contido na lignina (Quesada, 2004).

A produção de matéria seca consegue atingir o patamar de quase 35 toneladas por hectare por ano, mesmo em solo pobre em nitrogênio (Morais et al., 2009). A produção dos

genótipos selecionados por sua alta fixação biológica de nitrogênio (FBN) em três cortes, num período de 22 meses, na região de Seropédica- RJ, é apresentada na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Produção de matéria seca sobre dois tipos de solos e com três cortes num período de 22 meses

Genótipo	1º corte	2º corte	3º corte	Total Produção em 22 Meses	Média Produção em 12 meses
	(mg/ha)				
Latossolo Vermelho-Amarelo					
CNPGL F06-3	26,6	22,1	10,7	59,4	32,4
Gramafante	23,6	8,1	11,7	53,4	29,1
Bag 02	24,3	27,9	14,5	66,6	36,3
Roxo	20,3	26,1	6,7	53,0	28,9
Cameroon	29,5	20,1	12,3	61,9	33,8
Médias	24,9	22,9	11,2	58,9	32,1
Planossolo					
CNPGL F06-3	28,4	22,8	7,0	58,2	31,7
Gramafante	28,9	15,0	9,3	53,1	29,0
Bag 02	28,1	17,8	9,7	55,6	30,3
Roxo	21,1	18,8	5,1	45,0	24,5
Cameroon	32,0	20,1	10,9	63,1	34,4
Médias	27,7	18,9	8,4	55,0	30,0

Fonte: adaptado de Morais (2009).

A segunda linha de pesquisa sobre a produção de biomassa pelo capim-elefante visa a melhorá-lo pelo cruzamento com outra espécie do gênero *Pennisetum*. Um cruzamento promissor foi conseguido entre o capim-elefante comum (*Pennisetum purpureum* Schum) e o milheto (*Pennisetum glaucum*), mediante a adição de Colcichina. Este capim foi obtido por Hanna em 1980, na estação experimental de Tifton, no estado da Geórgia/USDA-ARS/UG-USA, e em 1995 foi introduzido no Brasil, pelo engenheiro-agrônomo Herbert Vilela, no município de São Sebastião do Paraíso (MG), através da MATSUDA GENÉTICA, com o nome de capim-elefante Paraíso (homenagem ao município).

O milheto, também conhecido como peniciliaria, é uma gramínea que apresenta rusticidade, grande resistência à seca, além de ser palatável e nutritivo para o gado. Ele é plantado no sul do País como pastagem de verão e em região de cerrado, como safrinha (Silva et al., 2003).

O objetivo da produção de biomassa pelo híbrido chamado hoje capim-elefante Carajás (ex Paraíso) é aperfeiçoar sua produção de matéria seca com uma adubação adequada.

2.3.4 O potencial energético do capim-elefante

Seye (2000) estudou a termogravimetria do capim-elefante e de três outras biomassas (bagaço e palha de cana-de-açúcar, resíduo de madeira). O capim-elefante revelou qualidades satisfatórias especialmente para produção de carvão. No entanto, apesar de ter alto teor de lignina, apresenta o inconveniente de produzir uma grande quantidade de cinzas (11,34%).

Em outro experimento, Seye (2000) estudou a viabilidade técnica de utilizar o capim-elefante na indústria de cerâmica vermelha. Foram feitos testes de diferentes níveis de mistura entre o capim-elefante e o cavaco de madeira. Não foi possível alimentar o forno pela rosca-sem-fim somente com o capim-elefante, pois a biomassa do capim-elefante solto tem uma capacidade a granel baixa, em torno de 55kg/m³. Foi necessário misturá-lo com o cavaco de madeira para conseguir alimentar corretamente o forno, sendo a densidade a granel do cavaco de madeira em torno de 280 kg/m³.

O potencial energético do capim-elefante, como toda biomassa, está relacionado ao seu teor de fibra, especialmente lignina. Um método para avaliar a quantidade de lignina utiliza um detergente ácido específico com a finalidade de solubilizar o conteúdo celular e a hemicelulose. Um resíduo insolúvel no detergente ácido é obtido, denominado fibra em detergente ácido (FDA), constituído em quase sua totalidade de celulose (lignocelulose) e lignina.

Quesada et al. (2004) demonstraram que os valores percentuais de FDA e seus componentes variam com o intervalo entre cortes, e também com a umidade ocorrida no período de crescimento das plantas, e é inversamente proporcional aos teores de proteína das plantas. Assim, quando manejadas com cortes de seis em seis meses, as plantas de capim-elefante apresentam valores de FDA alta, acima de 50%. Pode-se deduzir que quanto maior o intervalo entre cortes, mais lignificado é o material vegetal e maior o potencial energético da biomassa.

A energia produzida em uma bomba calorimétrica é expressa em kcal/kg de matéria seca e normalmente é usada para avaliar o valor energético de uma determinada fonte. Os teores de carbono e de hidrogênio nos tecidos vão determinar esse nível de energia potencial. Poucos são os trabalhos científicos para estimativa do poder calorífico da biomassa do capim-elefante.

Habitualmente, o poder calorífico superior da matéria seca do capim-elefante é estimada em torno 4200 kcal/kg. Vilela (2008) encontrou um valor para o poder calorífico de capim-elefante Carajás a 4.298 kcal/kg, enquanto Pereira et al. (1999) mediram o poder calorífico do capim-elefante var. Napier a 4.170 kcal/cal.

2.4 CUSTOS DE PRODUÇÃO DE BIOMASSAS PARA ENERGIA NO MUNDO

Nos últimos dez anos vários estudos foram realizados, no mundo inteiro, para estimar o custo de produção da energia fornecida a partir da biomassa. A biomassa vem adquirindo uma importância estratégica para o suprimento em energia de vários países, especialmente da União Européia. Portanto, a estimativa do seu custo de produção é crucial para saber até qual nível pode ser uma fonte confiável, segura e acessível de energia.

A estimativa do custo de produção é também uma ferramenta usada na comparação das regiões possíveis para investimentos futuros. Hoogwijk et al. (2009) estimam que até 2050 as culturas energéticas poderão suprir de 40 até 70 % do consumo em energia do mundo e atingir um total de 130–270 EJ por ano. Isso será possível utilizando as terras abandonadas pela agricultura e as terras marginais, sem destruição de ecossistemas naturais e desmatamento. Outra condição é que o custo de produção fique em torno de 2\$₂₀₀₆/Gj (R\$4,4/Gj) para competir com o carvão fóssil, cujo custo de uso em termoeletricas vai crescer com a necessidade de seqüestro subterrâneo do CO₂. Das regiões do mundo com potencial de produção, destacam-se as antigas repúblicas da União Soviética, o oeste e leste da África e o leste da Ásia, pois essas regiões têm um custo da terra particularmente baixo.

Wit et al (2009) apresentam o custo de produção como o resultado da soma de quatro fatores: o custo da terra, o custo do trabalho, o custo do capital e o custo dos fertilizantes. Os três primeiros são custos avaliados por hectare e o último, o custo dos fertilizantes, é avaliado em função do nível de produção da biomassa.

Dois fatores principais influenciam o custo da terra: a fertilidade e a demanda para terra. O custo do trabalho é determinado pela quantidade de trabalho necessário por cada cultura e pelo custo horário do trabalho. O custo de capital vem principalmente dos gastos em máquinas e com sua manutenção e é repartido em função da fase da produção da cultura: (i) estabelecimento e plantio, (ii) colheita e transporte na campo e (iii) estocagem. O custo da fertilização é normalmente estimado em função da extração de nutrientes durante a colheita da biomassa. A produção é importante, mas a cultura ou o plantio precisará de reposição equivalente de fertilizantes.

Van Dam et al. (2007) estudaram vários cenários da futura produção de energia a partir de biomassa, na Europa. As culturas linhocelulósicas, especialmente o *willow* conduzido em TCR, têm grande potencial de desenvolvimento futuro, especialmente na Polônia, na Romênia e na Ucrânia, graça a um custo de produção abaixo de € 2/Gj (R\$ 5,08/ Gj)¹.

Smeets e Faaij (2009) estudaram o impacto da aplicação estrita de uma certificação socioambiental sobre o custo de produção de biomassa em TCR de *Eucalyptus*, no Brasil, e de *Populus*, na Ucrânia. A certificação socioambiental será uma condição do crescimento de um mercado internacional da biomassa para energia, à imagem daquele das commodities. Nessa certificação serão observados alguns pontos, como: o trabalho infantil, o salário mínimo, as condições sanitárias no trabalho, o respeito aos recursos hídricos, a preservação da biodiversidade ou a impossibilidade de transformar as matas nativas em culturas energéticas.

A aplicação desses critérios socioambientais terá por consequência a elevação do custo médio de € 1,6/Gj para € 2,3/Gj no caso do *Eucalyptus* no Brasil e de € 1,8/Gj para € 2,1/Gj no caso do *Populus* na Ucrânia. Mesmo assim, a produção de energia a partir da biomassa fica atrativa, considerando o preço da energia fóssil. Está previsto que até 2015 o preço do gás seja em torno de € 4 /Gj e o preço do óleo diesel em torno de € 5/Gj. Com um custo de transporte de € 2/Gj, incluindo secagem, adensamento e estocagem, do lugar de produção no Brasil até a Europa, a energia provinda de TCR de *Eucalyptus* fica competitiva (Hamelinck et al., 2005).

¹ A taxa de câmbio das moedas no Banco Central do Brasil em 22/01/2010: 1\$ = 1,8 R\$, e 1€ = 2,54 R\$.

Alguns dados de custos de produção de biomassa para energia foram reunidos na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Custos de produção da biomassa para energia e outras fontes no Brasil e no mundo

Autor	Ano da Publicação	País	Produção	Custo Publicado	Custo em R\$/Gj PCS
Witt et al.	2009	União Europeia	Short Rotation Coppice (<i>willow, poplar, eucalyptus</i>)	2,5 - 4 €/Gj	6,35 - 10,16 R\$/Gj
			Herbaceas Perenes (<i>miscanthus, switchgrass, red canary grass</i>)	3,5 - 4,5 €/Gj	8,89 - 11,43 R\$/Gj
Carton et al.	2008	França	Miscanthus	12,8 - 13 €/MWh	9,03 - 9,17 R\$/Gj
			TCR willow	18,2 - 19 €/MWh	12,84 - 13,40 R\$/Gj
Ericsson et al.	2006	Polônia	Chips from TCR Willow	7 €/MWh (Polonha). 12-15 €/MWh (Europa do oeste)	4,93 R\$/Gj (Polonha) e 8,46 - 10,58 R\$/Gj (E. do oeste)
Van Dam et al.	2007	Europa Central e do Este	Perennial lignocellulosic biomass crops (<i>willow, poplar, miscanthus</i>)	1.0 – 4.5 €/GJ HHV	2,54 - 11,43 R\$/Gj
Van den Broek et al.	2000	Nicarágua	<i>Eucalyptus</i> para geração de eletricidade	1,7 US \$/GJ LHV	0,878 R\$/Gj
Faúndez	2003	Chile	<i>Eucalyptus</i>	0,0355 – 0,1662 UF/GJ	1,68 - 7,86 R\$/Gj
			<i>Pinus</i>	0,0626 – 0,3822 UF/GJ	2,96 - 18,06 R\$/Gj
			<i>Populus</i>	0,1201 – 0,1325 UF/GJ	5,68 - 6,26 R\$/Gj
			<i>Salix</i>	0,1387 – 0,1503 UF/GJ	6,56 - 7,10 R\$/Gj
Smeets et al.	2009	Brasil	<i>Eucalyptus</i>	1.5 – 3.2 €/ Gj	3,81 - 8,21 R\$/Gj
		Ucrânia	<i>Populus</i>	1.5 – 5.6 €/ Gj	3,81 - 14,22 R\$/Gj
Smeets et al.	2009	U.K e Itália	Pellets de Miscanthus e switchgras	3.6 – 5.8 €/ Gj	9,14 – 14,73 R\$/Gj
		Polônia, Hungria e Lituânia		2.4 – 3.6 €/ Gj	6,1 – 9,14 R\$/Gj

Taxa de cambio do Banco Central do Brasil em 18/01/2010: 1\$ = 1,8 R\$, e 1€ = 2,54 R\$. UF = Unidade de Fomento, = US\$26.26 (May 15, 2001).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os dados de produção volumétrica e energética do eucalipto usado neste estudo foram coletados pela equipe da RENABIO (Rede Nacional de Biomassa para Energia) e já empregados para outros estudos de *short rotation*. Esses dados provêm de um experimento realizado numa área da empresa ArcelorMittal BioEnergia, antiga ACESITA Energética, implantada em Itamarandiba (MG), na região do Vale do Jequitinhonha.

O clima da região é considerado como quente semi-úmido, com quatro a cinco meses secos. A temperatura média anual oscila entre 21 e 24 °C e a precipitação anual entre 900 e 1.200 mm. Os solos são aqueles encontrados frequentemente nessa faixa de clima típico de cerrado, ou seja, Latossolos Vermelho-Amarelos álicos com baixa fertilidade natural.

3.2 DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA DO EUCALIPTO

Para comparar o potencial energético do eucalipto com o do capim-elefante foi necessário comparar unidades equivalentes. A noção de volume de produto por hectare não é suficiente. Quando mais denso o material a avaliar, maior a concentração energética para a mesma unidade de volume. A quantidade de matéria seca produzida e sua densidade são as duas variáveis que vão entrar diretamente na apreciação da produção de energia da biomassa de cada vegetal.

Todos os dados a seguir foram concedidos pela RENABIO. A RENABIO é uma entidade civil sem fins lucrativos, que consiste de uma rede de entidades como universidades, instituições de pesquisas e desenvolvimento tecnológico e empresas privadas interessadas em pesquisa e desenvolvimento de programas na área de energia a partir de biomassa.

3.2.1 Obtenção da produção volumétrica

A empresa ArcelorMittal BioEnergia experimentou vários tratamentos possíveis do eucalipto para produção de biomassa energética. Ela utilizou um clone de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*. Um delineamento experimental em

blocos ao acaso foi instalado, no esquema de parcelas subdividas, onde a parcela foi representada pelo espaçamento e a subparcela pela idade. Três blocos foram instalados com os diferentes espaçamentos estudados. O espaçamento de 3 m entre linhas foi mantido por cada tratamento, variando o espaçamento na linha (3 m x 0,5 m, 3 m x 0,75 m, ..., 3 m x 3 m).

A partir do sexto mês foram realizadas coletas semestrais dos dados de campo, medindo-se o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total de oito árvores, selecionadas ao acaso, em cada tratamento. Para determinar o volume sólido (m³) e a densidade, foi abatida e cubada a árvore média em cada tratamento. O método de Smalian, com seções a cada 1,5 m, foi utilizado para estimar o volume das árvores. Conhecendo o volume da árvore média, foi possível calcular o volume por hectare. Os dados estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Produção volumétrica com casca acumulada para cada tratamento em diferentes idades

Espaçamento do Plantio (m x m)	Produção - Volume (m ³ cc/ha)				
	Idade (anos)				
	2	3	4	5	6
3,0x0,50	100,0	162,0	224,0	236,0	248,0
3,0x0,75	90,0	146,0	202,0	222,5	243,0
3,0x1,00	80,0	130,0	180,0	209,0	238,0
3,0x1,50	65,0	119,5	174,0	203,5	233,0
3,0x2,00	60,0	108,5	157,0	192,0	227,0
3,0x2,50	52,5	100,3	148,0	181,8	215,5
3,0x3,00	45,0	92,0	139,0	171,5	204,0

Fonte: RENABIO (2009).

Nessa tabela é possível perceber a relação estreita entre a densidade de plantio e a produção volumétrica nos primeiros anos. Aos dois anos, a produção volumétrica do plantio realizado na densidade de 3 x 0,5 m (100 m³) é mais que o dobro da produção do plantio em 3 x 3 m (45 m³). Portanto, com o tempo, a densidade de plantio inicial vai perdendo sua influência no volume produzido, e a diferença vai atenuando-se para chegar somente a 18% aos seis anos.

3.2.2 Obtenção da densidade básica a partir de discos

A Tabela 3.2 apresenta a influência da densidade de plantio inicial sobre a densidade básica. Percebe-se que a densidade aumenta à medida que a área de crescimento das árvores aumenta.

Tabela 3.2 - Resultado da densidade básica (Db) encontrada em cada tratamento

Espaçamento do Plantio (m x m)	Db (t./m ³)
3,0x0,5	0,48
3,0x0,75	0,50
3,0x1,0	0,51
3,0x1,5	0,52
3,0x2,0	0,52
3,0x2,5	0,54
3,0x3,0	0,56

Fonte: RENABIO (2009).

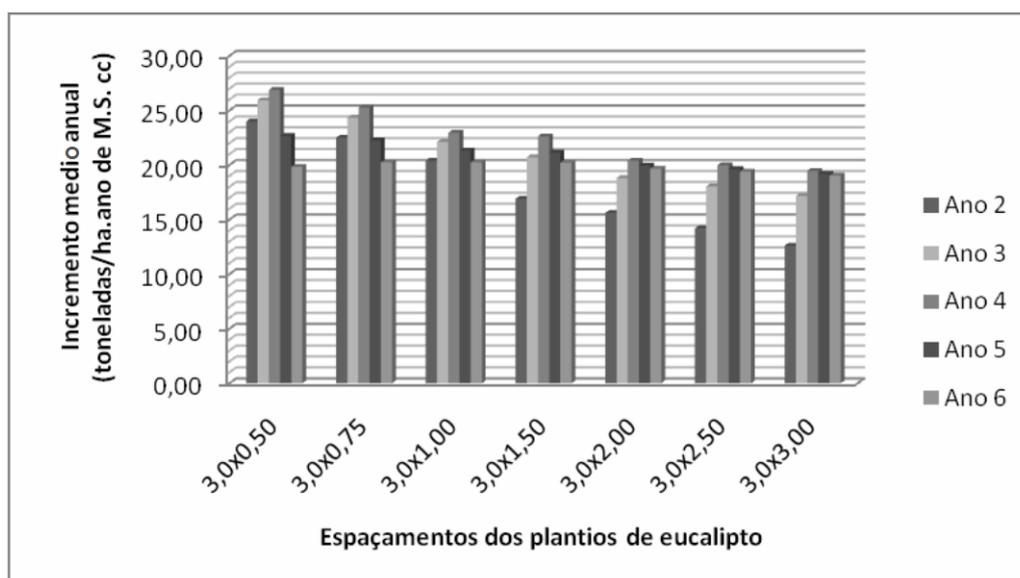
A Tabela 3.3 apresenta a produção de matéria seca total gerada para cada tratamento, em função da idade. A quantidade de biomassa seca foi muito parecida entre os tratamentos ao final dos seis anos. Maiores valores de densidade básica em menores densidades de plantio acabam compensando a produção volumétrica que se reduz com a abertura de espaço.

Tabela 3.3 - Biomassa seca com casca em tonelada por hectare produzida em cada tratamento

Espaçamento (m x m)	Produção Biomassa Seca Com Casca - (t/ha)				
	Idade (anos)				
	2	3	4	5	6
3,0x0,50	48,0	77,8	107,5	113,3	119,0
3,0x0,75	45,0	73,0	101,0	111,3	121,5
3,0x1,00	40,8	66,3	91,8	106,6	121,4
3,0x1,50	33,8	62,1	90,5	105,8	121,2
3,0x2,00	31,2	56,4	81,6	99,8	118,0
3,0x2,50	28,4	54,1	79,9	98,1	116,4
3,0x3,00	25,2	51,5	77,8	96,0	114,2

Fonte: RENABIO (2009).

A partir da quantidade total de biomassa (toneladas/hectare) é possível calcular o incremento anual médio e, conseqüentemente, determinar o ano de produção média máxima. A Figura 3.1 apresenta a evolução do incremento médio anual de biomassa produzida (toneladas de matéria seca cc/ha.ano) em função da densidade do plantio. O máximo de biomassa é produzido aos quatro anos no plantio adensado 3m x 0,50 m e atinge 26,88 toneladas/ha.ano.



Fonte: adaptado de RENABIO (2009).

Figura 3.1 - Produção de biomassa em função do espaçamento do plantio em incremento médio anual de matéria seca com casca.

3.2.3 Poder calorífico da biomassa de eucalipto

Nos tratamentos adotados pela ArcelorMittal BioEnergia e medidos pela equipe do RENABIO, a idade de corte do eucalipto foi diferente em função da densidade de plantio. Para densidades altas de plantio, 3 m x 0,5 m até 3 m x 1 m, o ciclo de produção previa o corte do eucalipto a cada dois anos, com a reforma do plantio após três cortes, ou seja, aos seis anos. Efetivamente essas altas densidades permitem um corte antecipado, gerando uma quantidade alta de biomassa, com o inconveniente de se colher uma madeira em grande parte juvenil de baixo poder calorífico.

Tabela 3.4 - Poder calorífico da madeira de eucalipto em função da densidade de plantio

Espaçamento do Plantio (m x m)	(kcal/kg)	(kcal/t)	(Gj/t)
3,0x0,5	4.464,50	4.464.500	18,69
3,0x0,75	4.484,75	4.484.750	18,77
3,0x1,0	4.505,00	4.505.000	18,86
3,0x1,5	4.503,00	4.503.000	18,85
3,0x2,0	4.551,10	4.551.100	19,05
3,0x2,5	4.531,00	4.531.000	18,97
3,0x3,0	4.510,80	4.510.800	18,88

Fonte: RENABIO (2009).

Com o tempo, o valor do poder calorífico vai subindo, até se equiparar entre diferentes tratamentos. Para as densidades menores, 3m x 1,5 m até 3 m x 3 m, o ciclo de corte foi a cada seis anos. A Tabela 3.4 mostra o poder calorífico da madeira na idade de corte de cada tratamento. Seu maior valor é atingido pelo plantio a 3m x 2m, cortado aos seis anos de idade. Os valores são levemente inferiores aos encontrados na literatura, que ficam acima de 4.600 kcal/kg (Vale et al., 2000). A última coluna transforma o poder calorífico em Gigajoule por tonelada, um kcal sendo igual a $4.186 \cdot 10^{-6}$ Gj.

3.2.4 Potencial energético do eucalipto

Na realidade, a energia disponível depende da quantidade de biomassa produzida, do seu poder calorífico e do teor de umidade. O cavaco ou a lenha quando chegam à caldeira têm um teor de umidade na ordem de 15 a 20%, em função das condições de estocagem e da higrometria ambiente, já que o teor de umidade da madeira se equilibra com seu ambiente.

Este estudo considerou o poder calorífico superior do eucalipto e do capim-elefante e seu custo de produção. O poder calorífico é uma noção indicativa da energia realmente disponível na usina, pois serão necessários 600 kcal para cada quilograma de água contida na biomassa para evaporá-la.

No experimento realizado no plantio da empresa ArcelorMittal BioEnergia, o potencial energético da biomassa produzida em cada tratamento foi o resultado da combinação da quantidade de matéria seca produzida e de seu poder calorífico, enquanto a quantidade de

matéria seca foi o resultado da multiplicação do volume colhido de madeira por sua densidade básica.

$$P_r E = V \times D_b \times P_{cs}$$

em que:

PrE = Produção de energia (kcal/ha),

V = Volume (m³/ha),

Db = densidade básica (kg/m³), e

Pcs = poder calorífico superior (kcal/kg).

O potencial energético pode ser expresso em calorias, mas também em joule ou em Watt/h. Neste estudo os cálculos foram realizados sobre um período de 18 anos, para obter um horizonte econômico de planejamento equivalente para cada tratamento. Assim, a quantidade de biomassa produzida durante esse horizonte foi atualizada em função da taxa de desconto escolhida. Os resultados foram transformados em gigajoule (GJ) para ter uma unidade facilmente comparável com do capim-elefante, e o gigajoule sendo uma unidade internacionalmente utilizada nos estudos sobre a produção de biomassa e seu custo (Cruz, 2004).

3.3 DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA DO CAPIM-ELEFANTE

3.3.1 A produção de matéria seca por hectare do capim-elefante

Este estudo visa a comparação econômica do eucalipto e do capim-elefante para produção de biomassa energética. Na literatura são acessíveis dados da produção de matéria seca atingida pelo capim-elefante em diferentes regiões do Brasil. A produção de biomassa depende, evidentemente, da qualidade do solo e da adubação recebida, como também dos fatores climáticos (temperatura e água disponível). Assim a produção de biomassa cresce com a quantidade de chuva recebida durante o ano e com o número de meses do período chuvoso. Infelizmente não existem dados de produção do capim-elefante para a mesma

região onde foi realizado o experimento de produção de biomassa do eucalipto por ArcelorMittal BioEnergia, no Vale da Jequitinhonha.

O método geralmente utilizado para obter a quantidade matéria seca a partir da massa verde colhida consiste em coletar algumas amostras de 1m² de capim-elefante no campo, escolhidas casualmente, e que sejam representativas do plantio em condição de produção. O material coletado é pesado em balança de precisão, para determinação da massa verde, e colocado para secar em estufa a 65°C, até peso constante. Quando a massa seca da amostra é conhecida, então é possível extrapolar para calcular a produção total por hectare.

Já foi visto que a produção de matéria seca do capim-elefante no Brasil varia de 15 toneladas até 45 toneladas por hectare por ano. Por isso será feita uma análise de sensibilidade em função de uma quantidade variável de matéria seca produzida numa faixa possível na região do cerrado. O limite superior estudado será uma produção de 40 toneladas, que já é pouco provável de ser atingido com o regime de chuva médio a baixo (em torno de 1.000 mm anual), que caracteriza essa parte do Vale do Jequitinhonha.

3.3.2 Potencial energético da biomassa do capim-elefante

Há necessidade de definir um método de comparação do valor energético da biomassa de eucalipto e do capim-elefante. A quantidade de matéria seca não é o indicador suficiente do potencial energético do capim-elefante. Deve-se integrar o poder calorífico e o teor de umidade do material. A capacidade de armazenamento da água pela palha de capim-elefante é muito alta, o que prejudica seu potencial energético, especialmente durante o período chuvoso, e dificulta bastante sua secagem.

O capim-elefante verde contém 80% de água e dificilmente seca no meio ambiente. Se for amontoado no campo o risco de começar o processo de fermentação é grande, diminuindo rapidamente seu valor energético. Sua secagem exige que ele seja picado. Mas pelas suas próprias características físicas, o capim-elefante "solto" é um material de baixa densidade energética, quando comparado com a lenha, sendo muito baixa a sua densidade a granel (aproximadamente 50-60 kg/m³, em média um teor de umidade em torno de 10 % (base úmida)) (Seye et al., 2003). Este material é de difícil escoamento durante a sua alimentação através de sistemas que usam silos.

Os dados utilizados neste estudo são aqueles obtidos a partir da revisão bibliográfica. O poder calorífico médio de 4.200 kcal/kg de matéria seca foi integrado no cálculo da quantidade total de energia produzida por hectare durante um ano.

3.4 ANÁLISE DO CUSTO DE PRODUÇÃO DA BIOMASSA

A dificuldade para poder comparar o custo da produção de biomassa do eucalipto e do capim-elefante vem do fato de a produção do capim-elefante ser anual (dois a quatro cortes por ano), enquanto aquela do eucalipto acontece em ciclo plurianual, cada dois-três a sete anos. Outra dificuldade vem do fato de serem dois produtos diferentes de difícil avaliação no mercado: a matéria seca de capim-elefante ou de eucalipto. Portanto, os dois podem ser estimados em termos de energia produzida: kcal ou gigajoule.

3.4.1 O método do custo médio de produção

O método do custo médio de produção (CMP_r) permite estabelecer números independentemente da quantidade produzida e da duração do investimento. Esse método é usado internacionalmente para apreciar o custo de produção de culturas energéticas perenes (Bullard, in Jones et al., 2001; Smeets et al. 2009).

O CMP_r resulta da relação entre o custo total atualizado (CT_j) e a produção total equivalente (QT_j). Esses valores são convertidos num mesmo período de tempo. Para poder comparar o capim-elefante, que tem uma colheita anual e um ciclo de vida útil de cinco a seis anos, e o eucalipto, o horizonte de planejamento considerado foi de 18 anos, para permitir uma produção em ciclos que coincidem com a duração das duas culturas.

Assim, comparou-se num mesmo horizonte de 18 anos o CMP_r do eucalipto com rotações de seis anos com duas rebrotadas, sendo uma para 12 e outra para 18 anos, o CMP_r do eucalipto reformado aos 6 anos e manejado com duas rebrotas em curtíssima rotação de dois anos, e o CMP_r do capim-elefante em corte anual e reformado a cada seis anos.

Calculou-se o CMP_r pela seguinte relação (Rezende et al., 2008):

$$CM Pr = \frac{\sum_{j=0}^n CT_j}{\sum_{j=0}^n QT_j} = \frac{\sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j}}{\sum_{j=0}^n Q_j (1+i)^{-j}}$$

em que

$CMPr$ = custo médio de produção em reais/ G_j ;

CT_j = custo total atualizado;

QT_j = produção total equivalente;

n = duração do investimento;

j = período de tempo em que os custos e as quantidades produzidas ocorrem; e

i = taxa de juros.

O resultado do $CMPr$ será expresso em reais por gigajoule; o gigajoule é bastante utilizado internacionalmente em estudos sobre produção das biomassas para energia e seus custos (Hoogwijk et al., 2009).

3.4.2 Custo médio de produção do eucalipto

3.4.2.1 Construção da tabela de custo de produção da biomassa do eucalipto

Neste estudo, foram analisados sete tratamentos diferentes com eucalipto. Os três primeiros correspondem a um manejo em plantio adensado em curtíssima rotação de dois anos (*ultra-short rotation*). A cada dois anos, o povoamento é cortado. Aos seis anos, após três rotações, o plantio é reformado para iniciar novo ciclo de três cortes. No total, em 18 anos, o manejo em curtíssima rotação produz três ciclos de três cortes cada um.

Os quatros outros tratamentos correspondem a um manejo considerado tradicional e normal no Brasil para produção de biomassa. São rotações de seis anos. O plantio é cortado aos seis anos e a brotação é conduzida para dois outros cortes. No total, após 18 anos nesse sistema, têm-se três cortes a partir de um mesmo plantio. A Tabela 3.5 resume os tratamentos para os quais foram calculados os custos. O custo de produção da energia da

biomassa será calculada em Gigajoule por reais considerando que é a unidade de custo internacionalmente utilizada nos estudos sobre a biomassa para energia.

O custo de colheita adotado foi o custo único para qualquer tratamento de 8,75 R\$/m³ cc; esse custo compreende o corte com um *feller*, a remoção com um *skidder* e o processamento.

Assim, para cada tratamento, durante 18 anos, os gastos foram contabilizados e atualizados com a taxa de juros para dar um resultado de custo total por hectare.

Tabela 3.5 - Produções em incremento médio anual dos diferentes tratamentos do eucaliptos

Densidade de Plantio	Tratamento	Produção em volume (m ³ /ha.ano)	Produção de Biomassa (t.cc/ha.ano)	Produção de Energia (Gj/ha.ano)
3 m x 0,5 m	Três ciclos de seis anos: Plantio + três cortes de dois anos	50,00	24,00	448,52
3 m x 0,75 m		45,00	22,50	422,40
3 m x 1,00 m		40,00	20,40	384,70
3 m x 1,50 m	Um ciclo com três cortes de 6 anos com condução da rebrota	38,75	20,20	380,76
3 m x 2 m		37,85	19,67	374,67
3 m x 2,50 m		35,90	19,40	367,96
3 m x 3 m		34,00	19,03	359,39

Fonte: adaptado de RENABIO (2009).

3.4.2.2 O custo da terra

O preço da terra foi computado no cálculo de custo para o eucalipto e o capim-elefante. O custo da terra é o capital imobilizado, constituindo um dos fatores que influencia o resultado do cálculo comparativo dos custos. Quanto maior for o custo da terra, maior será a vantagem para a cultura com rápida rotação.

O método utilizado para considerar o custo da terra foi considerado por Silva et al. (2008) como simples, porém confiável. Nesse método, o custo da terra é considerado como despesa no início do projeto e como receita ao final, tendo seu valor sido reajustado em função da taxa de juros e do tempo, tal como no trabalho de Müller (2005).

O valor da terra que foi integrado ao cálculo foi o seu valor líquido, ou seja, o custo real para o empreendimento. Efetivamente existe uma parte da superfície que vai ficar improdutiva e que se situa na ordem de 30% (construções, estradas, reservas legais, Áreas de Preservação Permanente, etc.).

Por exemplo, uma terra que vale 4.000 reais o hectare na compra tem um custo líquido superior, porque somente 70% serão produtivos. O custo real trazido por unidade de superfície é: $4.000/70\% = \text{R\$ } 5.714,3$ por hectare. Os valores líquidos que foram integrados na análise sensibilidade foram arredondados a 4.000, 4.286, 5.000, 6.000 e 7.000 reais. A quantia de 4.286 reais corresponde ao valor da terra no sítio de ACESITA. O preço da terra fixado pelo mercado reflete, de certa maneira, a fertilidade e as possibilidades agronômicas do local.

O valor que se pagou na aquisição da terra foi computado como custo no ano 1 e como receita ao final do horizonte de planejamento. O valor da receita é o valor da terra descontado sobre o horizonte de 18 anos.

$$\text{Valor de venda descontado} = \frac{\text{Venda}}{(1 + i)^t}$$

Na análise de sensibilidade, o custo/receita da terra foi um dos fatores que tiveram influência no resultado final.

3.4.3 Custo médio de produção do capim-elefante

3.4.3.1 Construção da tabela de custo de produção do capim-elefante

Para construção da tabela de custo de produção do capim-elefante foram usadas várias fontes. Duas tabelas foram estabelecidas, considerando que existem atualmente duas escolhas possíveis para a produção de biomassa a partir do capim-elefante.

A primeira solução visa uma produção a menor custo de adubação e menor uso de energia fóssil, sendo baseada numa limitação da fertilização nitrogenada. Este modelo usa genótipos de capim-elefante selecionados por sua alta capacidade de captar o nitrogênio

atmosférico, graça à fixação biológica da FBN. Nesse caso, a produção de matéria seca alcançada fica limitada pela disponibilidade de nitrogênio conseguida pela FBN. Os custos que foram contabilizados são aqueles disponíveis na literatura e fornecidos por Mazarella e Urquiaga (2006) (Tabela 3.6).

A segunda solução visa à produção otimizada com uma adubação balanceada e utilizando o híbrido Carajás. Neste caso, o custo de produção é maior, mas a quantidade de matéria seca produzida também é maior. A metodologia seguida para estimar o custo de implantação e de manutenção de uma capineira foi baseada no documento do Instituto Tecnológico do Paraná – TECPAR, editado pelo Sistema Brasileiro de Reposta Técnica (Leite, 2005).

Tabela 3.6 - Custos por hectare do capim-elefante BNF (zero N/ha)

Item de custo	Ano de Ocorrência	Custos por Hectare
Formação	Ano 1	1981,77
Colheita (uma só corte)	Ano 1	603,70
Total	Ano 1	2585,47
Manutenção	Anos 2 a 6	617,91
Colheita (duas cortes)	Anos 2 a 6	1207,40
Total por ano	Anos 2 a 6	1825,31

Fonte: adaptado de Mazarella e Urquiaga (2006).

Os custos da adubação provêm do nível preconizado por Vilela (2009) para a formação da capineira de capim-elefante Carajás (ex. Paraíso). Vilela (2009) preconizou no ano de formação da capineira uma quantidade significativa de fósforo de solubilidade gradual tipo termofosfato. Dependendo da fertilidade do solo, são 350 a 500 kg de termofosfato. Para a adubação de cobertura são aconselhados 750 kg de sulfato de nitrogênio, distribuídos em duas vezes (45 dias e 90 dias após plantio) e 60 kg de cloreto de potássio.

A adubação de manutenção deve ser anual. No primeiro ano são preconizados 250 kg de NPK (20:00:18) após cada corte, enquanto no segundo ano em diante são preconizados na primavera 300 kg de NPK (08:28:16) e 300 kg de NPK (20:0:18), distribuídos em duas etapas após cada corte.

Os custos de colheita foram aqueles publicados por Mazarella, do IPT, de São Paulo. Para que os dados sejam comparáveis com aqueles do eucalipto, foram também incluídos outros

itens, como o custo de estradas (abertura e manutenção). Não foram incluídos os custos de administração, como também não foram incluídos para o eucalipto.

O ciclo de vida útil do capim-elefante é normalmente de cinco a sete anos. Os cálculos de custos para o eucalipto prevêm uma duração total de 18 anos (três ciclos com reforma ou um ciclo com três conduções da rebrota). Por isso, os cálculos de custo do capim-elefante serão feitos neste mesmo horizonte de 18 anos, incluindo três ciclos totais de seis anos com implantação e manutenção e com dois cortes anuais.

A Tabela 3.7 reconstitui o conjunto de custos necessários para produção do capim Carajás (ex. Paraíso). Os custos de gestão e administração não foram contabilizados, como também não foram para o eucalipto.

Vilela (2009) sugere a implantação em outubro, com um corte em março, antes da floração da planta, e outro corte em outubro. Para estimar o custo da unidade produzida, foi prevista para o primeiro ano de implantação a metade da produção média dos anos de plena produção. O ano da implantação tem somente um corte, enquanto no ano seguinte até o final do ano 6 a capineira permite dois cortes anuais. Por consequência, o custo de colheita foi estimado a metade no primeiro ano do custo na plena produção.

Tabela 3.7 - Custos de uma capineira de boa produtividade com capim híbrido Carajás

Formação Ano 1	Custo por Hectare		
	Insumos	Mecanização	Mão-de-obra
Estradas		47,5	
Combate a formigas	61,0		31
Herbicida	37,0		50
Aração		150,0	
Calagem: calcário dolomítico 3t	180,0	50,0	
Gradagem e sulcamento		200,0	
Plantio (sementes ou mudas)			360
Termofosfato 500 kg	240,0	80,0	50
FTE BR12 60 kg	45,6		
Sulfato de amônio 500 kg	295,0	100,0	60
Cloreto de potássio 60 kg	74,0		
Inseticida	40,0		40
Colheita 1 corte		603,5	
Total	976,6	1.231,0	591
Total formação Ano 1		2.794,6	
Manutenção Ano 2			
Estradas		47,5	
Transporte insumos		100,0	
Adubo NPK (20:0:18) 500 kg	445,0	160,0	100
Inseticida	40,0		40
Herbicida	25,0		50
Colheita 2 cortes		1.207,0	
Total	510,0	1.514,5	190
Total manutenção ano 2		2.214,5	
Manutenção anos 3 a 6			
Estradas		47,5	
Transporte insumos		100,0	
Adubo NPK (20:0:18) 300 kg	265,0	80,0	60
Adubo NPK (05:25:15) 350kg	315,0	80,0	60
Colheita 2 cortes		1.207	
Total	580,0	1.514,5	120
Total manutenção ano 3 a 6		2.214,5	

Fonte: adaptado de Vilela (2009) e RENABIO (2009).

3.4.3.2 Custo da unidade energética do capim-elefante

Para calcular o custo de produção da unidade energética comparável ao custo do eucalipto, a produção energética do capim-elefante foi obtida ao multiplicar a quantidade de biomassa colhida anualmente por seu valor energético. Assim, a quantidade de matéria seca estimada foi multiplicada por seu poder calorífico médio (4.200 kcal/kg), e o resultado transformado em gigajoule (Gj), considerando o valor do kcal igual a $4.186.10^{-6}$ Gj. A transformação em gigajoule permite resultados de energia produzida de fácil manuseio. Por exemplo, uma produção de 40 toneladas de matéria seca representa um valor energético de $40 \times 1.000 \times 4.200 = 168.000.000$ kcal. Esse valor convertido em gigajoule representa 703,25 GJ ($168.000.000 \times 0,000004186$).

Essa produção anual vai ser descontada da taxa de juros, para ter uma produção energética equivalente a 18 anos. Por exemplo, com a taxa de desconto de 8%, uma capineira que produz anualmente 40 toneladas de MS vai gerar energia equivalente de 4.605,18 GJ. Os custos anuais sobre o período de 18 anos vão ser igualmente atualizados na mesma taxa de desconto e somados para obter um custo total atualizado.

Assim, o custo total atualizado é dividido pela produção equivalente, dando o valor do custo médio de produção da unidade energética. Por exemplo, considerando o custo total atualizado de 2.5710,23 reais e uma produção equivalente de 6.405,18 GJ, o capim-elefante produz o GJ a um custo de 4,29 reais.

3.4.4 Análise de sensibilidade e estatística.

Foi realizada uma análise de sensibilidade para comparar o custo medio de produção do eucalipto em diferentes densidades de plantio e idades de corte com do capim-elefante, em duas condições de produção: genótipos melhorados (FBN) cultivados sem adubação nitrogenada e híbrido capim Carajás com forte adubação. O comportamento econômico de cada produção foi analisado, variando-se a produção, a taxa de juros e o preço da terra. Uma análise estatística foi realizada para comparar os resultados de CMPr das diferentes produções (Pimental et al, 2002).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Custo de produção da unidade energética da biomassa de eucalipto

O custo médio de produção da unidade energética foi calculado em reais por gigajoule, para todas as situações estudadas. A Tabela 4.1 apresenta duas situações com a análise de sensibilidade para mostrar a sucessão de cálculo que foram realizados até chegar ao CMPr. Para cada tratamento foram integrados a densidade básica correspondente e o valor energético da matéria seca. Assim foi calculado o CMPr, variando a taxa de desconto e o preço da terra.

Tabela 4.1 - Exemplos de análise de sensibilidade do custo de produção da biomassa do eucalipto

Densidade do Plantio	Taxa de Juros (%/a.a)	Preço Líquido da Terra (R\$/ha)	Custo Total Atualizado	Produção na Idade Colheita (m ³ /ha.ano)	Produção Total Equivalente (m ³)	Densidade (t./m ³)	Poder Calorífico (kcal/t.MS)	Produção Equivalente (kcal/ha)	Produção Equivalente (Gj/ha)	Custo Médio Produção (R\$/Gj)
3m x 0,5 m	8%	4.000	19.512,90	50,00	450,57	0,48	4.464.500	965.553.487	4.041,81	R\$ 4,83
		4.286	19.798,90	50,00	450,57	0,48	4.464.500	965.553.487	4.041,81	R\$ 4,90
		5.000	20.512,90	50,00	450,57	0,48	4.4645.00	96.5553.487	4.041,81	R\$ 5,08
		6.000	21.512,90	50,00	450,57	0,48	4.464.500	965.553.487	4.041,81	R\$ 5,32
		7.000	22.512,90	50,00	450,57	0,48	4.464.500	96.5553.487	4.041,81	R\$ 5,57
3m x 2m	6,75%	4.000	11.531,16	37,85	327,25	0,52	4.551.100	774.460.687	3.241,89	R\$ 3,56
		4.286	11.816,87	37,85	327,25	0,52	4.551.100	774.460.687	3.241,89	R\$ 3,65
		5.000	12.531,16	37,85	327,25	0,52	4.551.100	774.460.687	3.241,89	R\$ 3,87
		6.000	12.531,16	37,85	327,25	0,52	4.551.100	774.460.687	3.241,89	R\$ 3,87
		7.000	13.531,16	37,85	327,25	0,52	4.551.100	774.460.687	3.241,89	R\$ 4,17

A Tabela 4.2 mostra um arranjo dos resultados da análise de sensibilidade do custo de produção da biomassa de eucalipto. Foram realçados em negritos os tratamentos que permitem o menor custo para cada situação de taxa de juros e de preço da terra.

Tabela 4.2 - Custo médio de produção (CMPr) da unidade energética (R\$/Gj) de biomassa de eucalipto em função do tratamento, da taxa de desconto e do preço da terra

Produção Média na Idade de Colheita		Tratamento Adensado em Rotação de 2 anos			Tratamento Tradicional em Rotação de 6 anos				Espaçamento do plantio ←
(m³/ha/ano)		50	45	40	38,75	37,85	35,9	34	
Taxa de juros (%/a.a)	Preço líquido da terra (R\$/ha)	3m x 0,5m	3m x 0,75m	3m x 1,00m	3m x 1,50m	3m x 2m	3m x 2,5m	3m x 3m	Custo Médio produção (R\$/Gj)
10%	4.000	5,20	5,07	5,26	4,53	4,49	4,49	4,51	
	4.286	5,28	5,16	5,36	4,65	4,61	4,61	4,63	
	5.000	5,49	5,37	5,59	4,94	4,91	4,91	4,95	
	6.000	5,77	5,68	5,93	5,36	5,33	5,34	5,38	
	7.000	6,06	5,98	6,26	5,77	5,75	5,77	5,82	
8%	4.000	4,83	4,70	4,87	3,93	3,90	3,89	3,91	
	4.286	4,90	4,77	4,95	4,03	4,00	3,99	4,01	
	5.000	5,08	4,96	5,15	4,28	4,25	4,25	4,27	
	6.000	5,32	5,22	5,44	4,62	4,60	4,60	4,63	
	7.000	5,57	5,49	5,73	4,96	4,94	4,96	4,43	
6,75%	4.000	4,60	4,47	4,62	3,59	3,56	3,55	3,56	
	4.286	4,66	4,54	4,70	3,68	3,65	3,64	3,65	
	5.000	4,83	4,71	4,88	3,89	3,87	3,86	3,88	
	6.000	5,05	4,95	5,15	4,20	3,87	4,18	4,20	
	7.000	5,28	5,19	5,41	4,50	4,17	4,49	4,20	
6%	4.000	4,47	4,33	4,48	3,39	3,36	3,35	3,36	
	4.286	4,53	4,40	4,55	3,47	3,44	3,43	3,44	
	5.000	4,68	4,56	4,73	3,67	3,65	3,64	3,66	
	6.000	4,89	4,78	4,97	3,96	3,93	3,93	3,95	
	7.000	5,10	5,01	5,22	4,24	4,22	4,23	3,95	
4%	4.000	4,11	3,98	4,10	2,90	2,88	2,86	2,86	
	4.286	4,16	4,03	4,16	2,98	2,94	2,93	2,93	
	5.000	4,29	4,17	4,31	3,13	3,11	3,10	3,10	
	6.000	4,47	4,36	4,52	3,36	3,34	3,34	3,35	
	7.000	4,65	4,55	4,73	3,59	3,57	3,57	3,59	

Analisando a tabela 4.2 pode-se concluir que os tratamentos em curtíssima rotação (dois anos) que permitem uma quantidade elevada de produção em termo de volume, têm um custo maior de produção que os tratamentos tradicionais. De todos os tratamentos, os plantios que apresentaram o menor CMPr foram mais frequentemente as densidades 3m x 2m ou 3m x 2,5m.

A análise estatística demonstra que os dois tratamentos são significativamente diferentes. Assim, fazendo o teste F, é possível afirmar que os dois tratamentos são estatisticamente diferentes ao nível de 1%, tendo um coeficiente de variação de 14,95% indicando um bom controle experimental.

Calculando a média dos resultados da análise de sensibilidade do CMPr, o eucalipto apresenta um CMPr da unidade energética em média de 4,92 R\$/Gj no caso do tratamento adensado e de 4,03 R\$/Gj no caso do tratamento tradicional, a média geral sendo de 4,41 R\$/Gj, variando de 2,86 R\$/Gj a 6,26R\$/Gj.

4.1.2 Custo de produção da unidade energética da biomassa de capim-elefante

A análise de sensibilidade foi realizada para duas opções de cultivos de capim-elefante com finalidade energética: o capim-elefante com fixação biológica de nitrogênio (FBN) e o capim híbrido Carajás (ex. Paraíso). O primeiro com um custo de adubação mais barato. Não há na literatura referências de cultivos comparados para conhecer a produção de cada variedade em condições equivalentes de sítio e clima.

A análise de sensibilidade (Tabela 4.3) permitiu mostrar os fatores que têm maior influência na formação do custo médio de produção da unidade energética (R\$/Gj). Mudando a taxa de juros, o custo da terra e a produção em cada cultivo, pode-se perceber a forte influência do volume de biomassa produzida na formação do CMPr. As oscilações do custo da terra e da taxa de juros não são preponderantes, como o é a quantidade de biomassa para atingir um CMPr mais barato.

Percebeu-se que para um mesmo nível de produção em matéria seca, o capim-elefante FBN cultivado sem nitrogênio produziu a unidade energética mais barata. Isso é um resultado importante para o desenvolvimento desse tipo de cultura no futuro, considerando que as culturas energéticas devem ser econômicas em adubação, especialmente o nitrogênio, que precisa de energia fóssil para ser produzido.

Portanto, se capim híbrido Carajás atinge uma produção 5 toneladas acima do capim NBF num mesmo sítio, então, neste caso, ele produziu uma unidade energética mais barata. Assim, por exemplo, é possível constatar na primeira linha da Tabela 4.3, com uma taxa de

10% e um custo da terra de 4.000, que o capim-elefante BNF produziu 25 toneladas a R\$5,96/Gj e o capim híbrido Carajás produziu 25 toneladas a R\$6,86/Gj e 30 toneladas a R\$5,71/GJ.

Tabela 4.3 - Variação do CMPr da unidade energética (R\$/Gj) para o capim-elefante

Taxa de Juros (%/a.a)	Preço da Terra (R\$/ha)	Variedade com BNF. Okg N/ha Produção em Toneladas de MS				Híbrido Capim-elefante Carajás Produção em Tonelada de MS			
		20 t	25 t	30 t	35 t	25 t	30 t	35 t	40 t
10%	4.000	7,45	5,96	4,97	4,26	6,86	5,71	4,90	4,29
	4.286	7,54	6,03	5,02	4,31	6,92	5,77	4,94	4,33
	5.000	7,74	6,19	5,16	4,42	7,09	5,91	5,06	4,43
	6.000	8,03	6,42	5,35	4,59	7,32	6,10	5,23	4,57
	7.000	8,32	6,66	5,55	4,75	7,55	6,29	5,39	4,72
8%	4000	7,19	5,75	4,79	4,11	6,64	5,53	4,74	4,15
	4.286	7,25	5,80	4,83	4,14	6,70	5,58	4,78	4,18
	5.000	7,42	5,94	4,95	4,24	6,83	5,69	4,88	4,27
	6.000	7,65	6,12	5,10	4,37	7,02	5,85	5,01	4,39
	7.000	7,89	6,31	5,26	4,51	7,20	6,00	5,15	4,50
6,75%	4.000	7,01	5,61	4,68	4,01	6,51	5,42	4,65	4,07
	4.286	7,07	5,66	4,71	4,04	6,55	5,46	4,68	4,09
	5.000	7,21	5,77	4,81	4,12	6,66	5,55	4,76	4,17
	6.000	7,41	5,93	4,94	4,24	6,82	5,69	4,87	4,27
	7.000	7,61	6,09	5,08	4,35	6,98	5,82	4,99	4,36
6%	4.000	6,91	5,53	4,61	3,95	6,42	5,35	4,59	4,01
	4.286	6,96	5,57	4,64	3,98	6,46	5,39	4,62	4,04
	5.000	7,09	5,67	4,73	4,05	6,57	5,47	4,69	4,10
	6.000	7,27	5,81	4,85	4,15	6,71	5,59	4,79	4,19
	7.000	7,45	5,96	4,96	4,25	6,85	5,71	4,89	4,28
4%	4.000	6,63	5,31	4,42	3,79	6,20	5,17	4,43	3,87
	4.286	6,67	5,33	4,44	3,81	6,23	5,19	4,45	3,89
	5.000	6,75	5,40	4,50	3,86	6,30	5,25	4,50	3,93
	6.000	6,87	5,50	4,58	3,93	6,39	5,33	4,57	3,99
	7.000	6,99	5,59	4,66	4,00	6,49	5,41	4,63	4,05

Fazendo a média da tabela por variedade e do conjunto, O CMPr do capim elefante BNF é em média de 5,54 R\$/Gj enquanto o CMPr do capim elefante Carajás atinge em média 5,34 R\$/Gj. Em média o CMPr da unidade energética do capim elefante é de 5,44 R\$/Gj, variando de 3,79 a 8,32 R\$/Gj. A análise estatística demonstra que não há diferença

estatisticamente significativa entre os dois cultivos do ponto de vista do custo de produção, o coeficiente de variação de 20,44 % sendo ainda dentro de um bom padrão.

4.1.3 Comparação eucalipto/capim-elefante

A Tabela 4.4 permite a comparação das duas culturas com as variações possíveis de Custo médio de produção, para os níveis de produção possíveis.

Tabela 4.4 - Tabela comparativa do custo médio de produção (R\$/Gj) do eucalipto com o do capim-elefante

		Eucalipto		Capim elefante							
		Produção média na idade de colheita (m ³ /ha.ano)		Variedade com BNF. O kg N/ha (t. MS/ha.ano)				Híbrido Capim elefante Carajás (t. MS/ha.ano)			
Taxa de juros (% a.a)	Preço líquido da terra (R\$/ha)	37,85	35,9	20	25	30	35	25	30	35	40
10%	4.000	4,49	4,49	7,45	5,96	4,97	4,26	6,86	5,71	4,90	4,29
	4.286	4,61	4,61	7,54	6,03	5,02	4,31	6,92	5,77	4,94	4,33
	5.000	4,91	4,91	7,74	6,19	5,16	4,42	7,09	5,91	5,06	4,43
	6.000	5,33	5,34	8,03	6,42	5,35	4,59	7,32	6,10	5,23	4,57
	7.000	5,75	5,77	8,32	6,66	5,55	4,75	7,55	6,29	5,39	4,72
8%	4.000	3,90	3,89	7,19	5,75	4,79	4,11	6,64	5,53	4,74	4,15
	4.286	4,00	3,99	7,25	5,80	4,83	4,14	6,70	5,58	4,78	4,18
	5.000	4,25	4,25	7,42	5,94	4,95	4,24	6,83	5,69	4,88	4,27
	6.000	4,59	4,60	7,65	6,12	5,10	4,37	7,02	5,85	5,01	4,39
	7.000	4,94	4,96	7,89	6,31	5,26	4,51	7,20	6,00	5,15	4,50
6,75%	4.000	3,56	3,55	7,01	5,61	4,68	4,01	6,51	5,42	4,65	4,07
	4.286	3,65	3,64	7,07	5,66	4,71	4,04	6,55	5,46	4,68	4,09
	5.000	3,87	3,86	7,21	5,77	4,81	4,12	6,66	5,55	4,76	4,17
	6.000	3,87	4,18	7,41	5,93	4,94	4,24	6,82	5,69	4,87	4,27
	7.000	4,17	4,49	7,61	6,09	5,08	4,35	6,98	5,82	4,99	4,36
6%	4.000	3,36	3,35	6,91	5,53	4,61	3,95	6,42	5,35	4,59	4,01
	4.286	3,44	3,43	6,96	5,57	4,64	3,98	6,46	5,39	4,62	4,04
	5.000	3,65	3,64	7,09	5,67	4,73	4,05	6,57	5,47	4,69	4,10
	6.000	3,93	3,93	7,27	5,81	4,85	4,15	6,71	5,59	4,79	4,19
	7.000	4,22	4,23	7,45	5,96	4,96	4,25	6,85	5,71	4,89	4,28
4%	4.000	2,88	2,86	6,63	5,31	4,42	3,79	6,20	5,17	4,43	3,87
	4.286	2,94	2,93	6,67	5,33	4,44	3,81	6,23	5,19	4,45	3,89
	5.000	3,11	3,10	6,75	5,40	4,50	3,86	6,30	5,25	4,50	3,93
	6.000	3,34	3,33	6,87	5,50	4,58	3,93	6,39	5,33	4,57	3,99
	7.000	3,57	3,57	6,99	5,59	4,66	4,00	6,49	5,41	4,63	4,05

As colunas para o eucalipto são aquelas do tratamento tradicional com corte aos seis anos de idade. Par cada situação, a melhor solução comparando as duas produções é realçada em negrito. Pode-se perceber que o eucalipto apresentou um custo de produção baixo, plenamente competitivo comparado ao do capim-elefante.

As análises de sensibilidade do custo médio de produção das duas culturas energéticas mostram que o eucalipto começa a ficar menos competitivo somente em certas condições: quando a taxa de juros elevada se associa a um elevado preço da terra e quando o capim-elefante atinge um patamar elevado de produção igual ou superior a 35 toneladas/ha.ano.

A formação do CMPr do capim elefante é fortemente influenciada pela quantidade de biomassa produzida, mais que por os outros fatores como o preço da terra ou a taxa de juros. Entretanto para o eucalipto, o conjunto desses três fatores formam o CMPr, cada um deles tendo o mesmo nível de relevância.

A análise estatística demonstra que as quatro culturas são significativamente diferentes ao nível de 1% com o coeficiente de variação de 18,59% sendo de nível razoável.

Fazendo o teste de Newman Keuls, é possível afirmar que os dois capins são iguais entre si sendo esse mesmo custo médio superior ao do eucalipto.

Tabela 4.5 – Resultado do teste de Newman Keuls comparando o CMPr das culturas energética de capim elefante e de eucalipto

Cultura energética	Media	Comparações
Capim elefante BNF	5,54	a
Capim hibrido Carajás	5,34	a
Eucalipto em plantio adensado	4,92	b
Eucalipto em plantio tradicional	4,03	c

Os dados de produção do eucalipto provêm da ArceloMittal Bioenergia nos plantios realizados em Itamarandiba (MG), na região do Jequitinhonha. São condições difíceis para qualquer cultura. A pluviometria anual oscila entre 900 e 1.100 mm e os solos são pobres. Pode-se questionar se o capim-elefante, nessas condições, teria capacidade de produzir anualmente, em média, 35 ou 40 toneladas de MS por hectare.

O eucalipto tem sua capacidade produtiva aumentada quando as condições de solo e de clima (chuvas) são mais favoráveis. Incrementos médios anuais (IMA) de 45 m³/ha.ano já são frequentemente atingidos em muitos lugares do Brasil, mesmo em áreas de cerrado (ABRAF, 2009). Neste caso, espera-se um CMPr ainda mais baixo.

A tendência atual na economia brasileira é de baixar as taxas de juros. Atualmente os projetos agrícolas e florestais conseguem juros anuais de 6,75%, o que é favorável ao eucalipto. Com essa taxa, em todos os casos o eucalipto fica mais rentável, com um custo mais barato. A Tabela 4.4 demonstra também que com a diminuição da taxa de desconto o CMPr cai significativamente para o caso do eucalipto (R\$4,49: R\$2,88) e para o capim-elefante (R\$4,29: R\$3,87).

4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O eucalipto conduzido em talhadia tradicional apresenta a vantagem de custo de implantação diluído num período mais longo, 18 anos ou mais. A colheita ocorrendo somente aos seis, sete ou oito anos pode ser vista como desvantagem, comparada a plantas de ciclo anual, ou mesmo com a talhadia de curtíssima rotação (dois anos). No entanto, pode representar um ponto positivo devido à menor intervenção nas áreas e ao fato de os custos de maquinários serem diluídos em razão da grande quantidade de biomassa colhida.

Pode-se constatar que a quantidade e a qualidade energética de biomassa produzida pelo eucalipto colhido aos seis anos são significativamente importantes. Esses dois fatores permitem compensar a longa espera, mesmo quando comparando a colheitas em rotações mais curtas. A alta taxa de crescimento do eucalipto proporciona vantagens econômicas que compensam as taxas de juros moderadas. Mesmo uma cultura perene de alta produtividade como o capim-elefante não consegue igualar tal desempenho.

É fundamental reduzir o custo da colheita e dos impactos ambientais. A produção de biomassa energética a partir da lenha de eucalipto será viável desde que se aperfeiçoem as operações para se ajustarem aos custos de produção. O manejo deve ser adequado, permitindo uma produção de madeira com o uso mínimo de fertilizantes.

Além disso, com a tendência atual de redução das taxas de juros, torna-se possível produzir ciclos mais longos, com menores taxas de exportação de nutrientes do solo via toneladas de MS.

Na etapa da colheita do eucalipto, é importante escolher um sistema de máquinas que permita diminuir o custo por m³ e deixar os resíduos no campo. A vantagem da remoção dos galhos e da copa *in situ*, que é geralmente realizada por um *harvester*, é de favorecer a ciclagem natural dos nutrientes e de limitar, assim, o custo de adubação a médio prazo. Martins et al. (2009) demonstraram que o custo por m³ é otimizado com árvores crescendo a um espaçamento maior.

É importante salientar que o custo médio da produção da unidade energética foi calculado a partir da matéria seca. Não se pode perder de vista que a biomassa tem sempre um teor de umidade que facilmente pode se tornar um fator limitante. Esse problema é mais sério no caso do capim-elefante, que é cortado com um teor de umidade em torno de 80% e tem grande dificuldade de secar sem que o processo de fermentação se inicie. A questão técnica é: Como não perder boa parte da energia estocada nas fibras, pelo simples fato de ser necessário secar o capim-elefante antes de poder queimá-lo e, assim, aproveitar sua energia?

A solução para o capim-elefante talvez seja fazer um só corte anual no início da estação seca, com a vantagem de se ter um teor de umidade menor e a facilidade de estocar o material. Isso permitiria também limitar o consumo de fertilizantes, especialmente o nitrogênio. Assim, cortar o capim-elefante após o final de ciclo vegetativo da planta, quando já aconteceu a retranslocação dos elementos nutritivos das partes aéreas para as raízes, vai diminuir tanto o nível de produção, como também o custo de adubação no longo prazo.

4.3 PROPOSTAS DE PESQUISAS FUTURAS

Nos futuros estudos sobre rotações de plantios tradicionais e adensados tornam-se necessárias pesquisas sobre o manejo dos plantios de forma global para o uso racional da terra como fator de produção, logo são sugeridas as seguintes propostas:

- Explorar outras possibilidades na produção de biomassa pelo eucalipto, por exemplo, plantios de alta densidade (5.555 m/ha), mas cortados no máximo IMA (cinco anos). A Tabela 4.5 mostra que a produção média anual continua crescendo até cinco anos. Cortar nesse momento permitiria reduzir o custo de implantação, diluindo-o sobre um maior volume de biomassa. Neste caso, a solução seria fazer um ciclo com rotação de cinco anos.

Tabela 4.6 - Produção de biomassa seca com casca: peso total (toneladas/ha) e Incremento Médio Anual da matéria seca

Espaçamento (m x m)	Idade (anos)					
		2	3	4	5	6
3,0 x 0,50	PT	48,00	77,80	107,50	113,30	119,00
	IMA	24,00	25,93	26,88	28,33	19,83
3,0 x 0,75	PT	45,00	73,00	101,00	111,30	121,50
	IMA	22,50	24,33	25,25	27,83	20,25
3,0 x 1,00	PT	40,80	66,30	91,80	106,60	121,40
	IMA	20,40	22,10	22,95	26,65	20,23

Fonte: RENABIO (2009).

- Estudar a eficiência energética do eucalipto, ou seja, contabilizar a energia gasta em todas as etapas de produção da biomassa e avaliar a energia produzida pelo eucalipto pela fotossíntese e disponibilizada na queima da biomassa. A eficiência energética será a diferença entre a energia necessária para a produção da biomassa e a energia liberada pela biomassa. Esse balanço poderá ser comparado ao do capim-elefante e de outras culturas energéticas, como foi feito na Europa (Boehmel et al., 2008). Deve-se também verificar a eficiência energética da produção de biomassa de eucalipto em função da densidade de plantio, que tem repercussão nos gastos energéticos no plantio e na colheita.
- Avaliar o saldo de carbono da atividade de produção de biomassa do eucalipto, ou seja, fazer o balanço entre o carbono fixado pelo eucalipto e o carbono liberado para seu cultivo e sua colheita, e observar qual é o melhor tratamento do eucalipto nessa direção.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, pode-se inferir que:

- A produção de biomassa (t.MS/ha.ano) do eucalipto em plantios adensados cortados aos dois anos, bem como nos plantios tradicionais cortados aos seis anos, pode ser menor que a produção de biomassa do capim-elefante, dependendo do material genético utilizado. No caso do plantio da ArcelorMittal BioEnergia, localizado em Itamarandiba (MG), a produção máxima de biomassa do eucalipto atingiu 26,88 toneladas/ha.ano, enquanto a produção do capim-elefante pode chegar até 40 toneladas/ha.ano no Brasil.
- Dos dois tratamentos estudados para o eucalipto, o sistema tradicional de corte a cada seis anos e condução de duas rebrotas revela-se mais vantajoso, comparado ao sistema adensado com corte a cada dois anos. O tratamento do eucalipto adensado foi prejudicado pelos custos altos, especificamente pelo plantio a cada seis anos com uma densidade elevada. O acréscimo de produção de madeira não é suficiente para cobrir o impacto desse custo maior.
- O eucalipto apresenta um CMPr, em média, de 4,41 R\$/Gj, variando de 2,86 a 6,26\$/Gj, inferior ao do capim-elefante, que é em média de 5,44 R\$/Gj, variando de 3,79 a 8.32 R\$/Gj.
- O capim-elefante teve um CMPr do gigajoule mais baixo que o do eucalipto somente em certas condições: preço alto da terra, elevada taxa de juros e elevadíssima produção de biomassa, sendo igual ou superior a 35 toneladas de matéria seca por ano.
- A biomassa para energia oriunda de plantios do eucalipto apresenta um CMPr inferior ao limite de 2 €/Gj (5,08 R\$/Gj) permitindo competir com outras fontes de energia na Europa. Até 2015 será possível desenvolver indústrias oriundas desta cultura para atingir o mercado internacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Caderno sobre Biomassa. Brasília, 2008. *Proceedings online...* Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- ANDERSSON, G., ASIKAINEN, A., BJÖRHEDEN, R., HALL, P.W., HUDSON, J.B., JIRJIS, R., MEAD, D. J., NURMI, J., ANDWEETMAN, G. F. In: *Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice*, pp. 49–123, J. Richardson, R. Björheden, P. Hakkila, A. T. Lowe and C. T. Smith, Eds. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 2002. 337p.
- ANDRADE, E.N. O eucalipto. 2.ed. Atualização por Armando Navarro Sampaio e Equipe do Serviço Florestal da Cia Paulista de Estradas de Ferro – 1961. *Proceedings online...* Disponível em: <http://www.celso-foelkel.com.br/artigos_outros12.html>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- AYLOTT, M.J.; CASELLA, E.; TUBBY, I.; STREET, N.R.; SMITH, P.; TAYLOR, G. Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-rotation coppice in the UK. *New Phytologist*, 178(3):358-370, 2008.
- AYLOTT, M.J.; TAYLOR, G.; CASELLA, E.; SMITH, P. Biomass role in the UK energy futures. The Royal Society, London: 28th & 29th July 2009 .
- AZEVEDO, P. B. M. Aspectos econômicos da produção agrícola do capim-elefante. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. *Proceedings online...* Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php? Script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100032&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- AZEVEDO, G.P.C.D., CAMARÃO, A.P., VEIGA, J.B. Criação de Gado Leiteiro na Zona Bragantina – Formação e utilização da capineira. Embrapa Amazônia Oriental. Dez./2005. *Proceedings online...* Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/fonteshtml/Leite/gadoleiteirozonabragantina/paginas/fcapineira.htm>>. Acesso em: 22 out. 2009.
- BALLONI, E.A. MIGLIORINI, A.J. BRITO J.O. Produção de energia através de florestas de rápido crescimento. Piracicaba: IPEF. 1980 (Circular Técnica IPEF, 103).
- BELLOTE, A. F. J. *Concentração, acúmulo e exportação de nutrientes pelo Eucalyptus grandis em função da idade*. 1979. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1979.
- BERNARDO, A.L. *Crescimento e eficiência nutricional de Eucalyptus spp. sob diferentes espaçamentos na região de cerrado de Minas Gerais*. 1995. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1995.

- BERGER R.; GARLIPP R.C.D. Aspectos econômicos do emprego de fertilizantes minerais na produção de madeira de *Eucalyptus saligna* no estado de São Paulo. *IPEF*, 20:49-58, 1980
- BERGER R.; GARLIPP R.C.D. Síntese econômica da geração de vapor para uso industrial: madeira vs óleo combustível. *Série Técnica IPEF*, 1(2): p.E.1-E.9, 1980.
- BODDEY, R.M., ALVES, B.J.R., URQUIAGA, S.S. Redução das emissões do gás carbônico através da produção de bioenergia utilizando Capim elefante. Folder da EMBRAPA Agrobiologia. Seropédica, RJ. Ano 2004. 2p.
- BOEHMEL, C.A.; LEWANDOWSKI, I.B.; CLAUPEIN, W. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agricultural Systems*, 96:224-236, 2008.
- BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. Piracicaba: IPEF, 1979. 7 p. (Circular Técnica IPEF, 52 PBP/3.1.8).
- BUCHHOLZ, T.; VOLK, T.; TENNIGKEIT, T.; SILVA I.P. Electricity production from energy forests: results from a feasibility and impact scoping study in northern Uganda for a 50 MWE grid model. *Proceedings online...* Available from: <<http://www.esf.edu/for/volk/buchholz/publications/buchholzberlin07.pdf>>. Access on: 12 June. 2008.
- BULLARD, M. *Economics of miscanthus production*. In: M.B. Jones and M. Walsh (Eds.), *Miscanthus – for Energy and Fibre*, James and James (Science Publishers), London (2001), pp. 155-171.
- CARTON, S. ; TRISTANT, D. ; GUIBOUT, F. ; LAPIERRE, O. Interêt et potentialites de la production de Miscanthus. Faisabilité du développement des cultures énergétiques en Île de France. AgroParisTech Projet Grignon Energie Positive Nov. 2008. *Proceedings online...* Available from: http://www.agroparistech.fr/energie-positive/IMG/pdf/MISCANTHUS_RAPPORT_INTERMEDIAIRE.pdf:> Access on: 22 January 2010.
- CEULEMANS, R.; DERAEDT, W. Production physiology and growth potential of poplars under short-rotation forestry culture. *Forest Ecology and Management*, 121(1-2):9-23, 1999.
- CLIFTON-BROWN, J.C.; STAMPFL, P.F.; JONES, M.B.. *Miscanthus* biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. In: *Global Change Biology*, 10(4):509-518, 2004.
- CLINCH, R.L.; THEVATHASAN, N.V.; GORDON, A.M.; VOLK, T.A.; SIDDEERS, D. Biophysical interactions in a short rotation willow intercropping system in southern Ontario, Canada Temperate agroforestry. In: *When trees and crops get together. Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(1-2):61-69, 2009.
- COOMBS, J. Biomass Energy - An Industry Waiting for Growth. *Renewable Energy*, 5(4):133-145, 2002.

- COSTA, N.D.L., TOWNSEND, C.R., MAGALHÃES, J.A., PEREIRA, R.G.D.A. Avaliação agronômica de clones de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) Em Rondônia CT/179, EMBRAPA-CPAF Rondônia, jul./00, p.1-4.
- COSTA, G.S.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; CUNHA, G.M.. Decomposição e liberação de nutrientes da serapilheira foliar em povoamentos de *Eucalyptus grandis* no norte fluminense. *Rev. Árvore* [online]. 2005, vol.29, n.4 [cited 2009-11-28], pp. 563-570. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622005000400008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 nov. 2009.
- CRUZ, P.T.A.; NOGEUEIRA, M.F.M. Oportunidades da biomassa energética no Brasil. *Biomassa e Energia*, 1(1):37-44, 2004.
- DICKMANN, D. I. Silviculture and biology of short-rotation woody crops in temperate regions: Then and now. *Biomass and Bioenergy*. 30:696–705, 2006.
- DIZ, D.S.; SCHANK, S.C. Characterization of seed producing pearl millet x elephantgrass hexaploid hybrids. *Euphytica*, 67:143-149, 1993
- ERICSSON, K.; ROSENQVIST, H.; GANKO, E.; PISAREK, M.; NILSSON, L. An agro-economic analysis of willow cultivation in Poland. *Biomass and Bioenergy*, 30:16-27, 2006.
- FERNANDES, M.C.; SANCHEZ, C.G. Projeto gaseificação de gramínea (*Pennisetum purpureum*). In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. *Proceedings online...* Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200002&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 2 dez. 2008.
- FERREIRA, C.A.; FREITAS, M.; FERREIRA, M. A variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp em função da idade e qualidade local. Boletim informativo. *IPEF*, 6(20): B-1/B-19, 1978.
- FERREIRA, C.A.; FREITAS, M.; FERREIRA, M. Densidade básica da madeira de plantações comerciais de eucaliptos, na região de Mogi-Guaçu (S.P.). *IPEF*, (18): 106-117, 1979.
- FINGER, C.A.G.; SCHUMACHER, M.V.; SCHNEIDER, P.R.; HOPPE, J.M. Influência da camada de impedimento no solo sobre o crescimento de *Eucalyptus grandis* (Hill) ex Maiden. *Ciência Florestal*, Santa Maria, 6(1):137-145, 1996.
- FRANCO, E.J.; SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M.; LIMA, J.T. Eficiência na estimativa do peso seco para árvores individuais e definição do ponto ótimo de amostragem para determinação da densidade básica de *Eucalyptus camaldulensis*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.8, n.1, p. 77-92, 1998.
- FAO. State of the World's forests 2009. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2009. *Proceedings online...* Available from: <<http://www.fao.org/docrep/011/i0350e/i0350e00.htm>>. Access on: 25 Nov. 2009.

- GARTEN, C.T. Soil carbon storage beneath recently established tree plantations in Tennessee and South Carolina, USA. *Biomass and Bioenergy*, 23:93-102, 2002.
- GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. *Química Nova*, Vol. 32, No. 3, 582-587, 2009
- GRIN - GERMPASM RESOURCES INFORMATION NETWORK. Taxonomy for Plants United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Beltsville Area. *Proceedings online...* Available from: <<http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/taxon.pl?27208>>. Access on: 25 Nov. 2009.
- GUIDI, W.; BONARI, E.; BERTOLACCI, M. Water Consumption of Poplar and Willow Short Rotation Forestry. Used as Vegetation Filter: Preliminary Results. ICID 21st European Regional Conference 2005 - 15-19 May 2005 - Frankfurt (Oder) and Slubice - Germany and Poland.
- HALL, J.P. Sustainable production of woody biomass for energy. In: XII World Forestry Congress, 2003. Quebec City, Canada. *Proceedings online...* Available from: <http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/0077-A1.HTM#P10_167>. Access on: 25 Nov. 2009.
- HAMELINCK, C.N.; SUURS, R.A.A., FAAIJ, A.P.C. International bioenergy transport costs and energy balance. *Biomass and Bioenergy*, 29:114–134, 2005.
- HOOGWYJK, M.; FAAIJA, A.; VRIES, B.D.; TURKENBURG, W. Exploration of regional and global cost–supply curves of biomass energy from short-rotation crops at abandoned cropland and rest land under four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 33:26-43, 2009.
- HYTÖNEN, J.; SAARSALMI, A.; ROSSI, P. Biomass production and nutrient uptake of short-rotation plantation. *Abstract: Silva Fennica*, 29(2):117-139, 1995.
- JOAQUIM, M.S.; SOUZA, A.N.; SANCHES, K.; QUENO, L. Análise econômica visando estimular a eucaliptocultura no município de mineiros, estado de Goiás. In: *V Simpósio de Pós-Graduação em Ciências Florestais*. Brasília, 14–16 de agosto de 2008.
- KEFFER, V.I.; TURN, S.Q.; KINOSHITA, C.M.; EVANS, D.E. Ethanol technical potential in Hawaii based on sugarcane, banagrass, Eucalyptus, and Leucaena. *Biomass and Bioenergy*, 33(2): 247-254, 2009.
- KIRCHHOF, G.; ECKERT, B.; STOFFELS, M.; BALDANI, J.I.; REIS, V.M.; HARTMANN, A. *Herbaspirillum frisingense* sp. nov., a new nitrogen-fixing bacterial species that occurs in C4-fibre plants. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 51:157-168, 2001.

- LANGHOLTZ, M.; CARTER, D.R.; ROCKWOOD, D.L. Assessing the Economic Feasibility of Short-Rotation Woody Crops in Florida. School of Forest Resources and Conservation, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. First published: May 2007. 5p.
- LEITE, L.T. Produção de carvão vegetal. Sistema brasileira de repostas técnicas. TECPAR – Instituto de Tecnologia do Paraná. 2005. 6p.
- LIEBIG, M.A.; JOHNSON, H.A.; HANSON, J.D.; AND FRANK, A. B. Soil carbon under switchgrass stands and cultivated cropland. *Biomass and Bioenergy*, 28:347-354, 2005.
- LIMA, C.R. Produtividade e equivalência energética de *Eucalyptus* sp. em relação ao óleo combustível e à energia elétrica.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. *Proceedings online...* Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100007&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 12 jun. 2008.
- LIMA, C.R. Energia, sociedade e desenvolvimento sustentável: o caso de Água Clara - MS. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. *Proceedings online...* Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200005&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 13 jun. 2008.
- LOPES, B.A. O Capim-Elefante. Seminário apresentado à disciplina ZOO 645 (Métodos nutricionais e alimentação de ruminantes) Universidade federal de Viçosa. Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Zoologia. Viçosa. 2004. 56p.
- MACEDO, I.C. Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento. Centro de Gestão e estudos Estratégicos – CTENERG, Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia, 11p. 2001.
- MACKENSEN, J.; FOËLSTER, H. Cost-analysis for a sustainable nutrient management of fast growing-tree plantations in East-Kalimantan, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 131:239-253, 2000.
- MAESTRI, R.; SANQUETTA, C.R.; MACHADO, S.A.; SCOLFORO, J.R.S.; CORTE, A.P.D.; Viabilidade de um projeto florestal de *Eucalyptus grandis* considerando o seqüestro de carbono. *Floresta*, 34(3):347-360, 2004.
- MALIK, R.K.; GREEN, T.H.; BROWN, G.F.; BEYL, C.A.; SISTANI, K.R.; MAYS, D.A. Biomass production of short-rotation bioenergy hardwood plantations affected by cover crops. *Biomass and Bioenergy*, 21(1):21-33, 2001.
- MARTINS, R.J.; SEIXAS, F.; STAPE, J.L. Avaliação técnica e econômica de um *harvester* trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. *Sci. For.*, Piracicaba, 37(83):253-263, 2009.

- MAZZARELLA, V.; URQUIAGA, S. – Capim elefante como fonte de biomassa para a siderurgia. In: Workshop sobre produção sustentável de ferro-gusa. 12 de setembro 2006 – Ouro-Preto, MG. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. *Proceedings online...* Disponível em: <www.abmbrasil.com.br/cim/download/10h45%20Mazzarela.pps>. Acesso em: 25 nov. 2009.
- MEAD, D.J. Forests for energy and the role of planted trees. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24:407-421, 2005.
- MERINO, A.; RODRÍGUEZ LÓPEZ, Á.; BRAÑAS, J.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. Nutrition and growth in newly established plantations of *Eucalyptus globulus* in northwestern Spain. *Ann. For. Sci.*, 60:509-517, 2003.
- MORAIS, R.F.; SOUZA, B.J.; LEITE, J.M.; SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.R.; BODDEY, M.; URQUIAGA, S. Elephant grass genotypes for bioenergy production by direct biomass combustion. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 44(2):133-140, 2009.
- MÜLLER, M.D. *Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG*. Tese de doutorado. UFV. Viçosa. 2005. 108 p.
- MÜLLER, M. D., TSUKAMOTO, A. A., VALE, R. S., COUTO, L. Produção de biomassa e conteúdo energético em sistemas agroflorestais com eucalipto, no município de Vazante, MG. *Biomassa & Energia*, 2(2):125-132, 2005.
- NETO, S.N.O.; REIS, G.G.; FERREIRA, M.R.; NEVES, J.C.L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* dehn. Em resposta à adubação e ao espaçamento. *Revista Árvore*, 27(1):15-23, 2003.
- NOGUEIRA, L.A.H. Informe sobre energia de biomassa no Brasil. Reunión regional sobre biomassa para la producción de energía y alimentos. La Habana, Cuba, 3 al 6 de noviembre de 1997. *Proceedings online...* Available from: <<http://www.fao.org/docrep/006/ad098s/AD098S06.htm>>. Access on: 27 Jul. 2009.
- OLIVEIRA, A.D.; SCOLFORO, J.R.S.; SILVEIRA, V.P. Análise econômica de um sistema agro-silvo-pastoril com eucalipto implantado em região de cerrado. *Ciência Florestal*, Santa Maria, 10(1):1-19, 2000.
- PAIXÃO, F.A.; SOARES, C.P.B.; JACOVINE, L.A.G.; SILVA, M.L.; LEITE, H.G.; SILVA, G.F. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. *Revista Árvore*, 30(3):411-420, 2006.
- PAULINO, V.T.; DE LUCENAS, T.L.; POSSENTI, R.A. Capim elefante cv. Paraíso (*Pennisetum hybridum*): produção de matéria seca, composição química e biológica em diferentes alturas de corte. Artigo online 2007 do Instituto de Zootecnia de São - Paulo *Proceedings online...* Disponível em: <<http://www.iz.sp.gov.br/artigos.php?Ano=2007>>. Acesso em: 19 jun. 2009.

- PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N.A.; MOREIRA, P.R.. Modelo para avaliação da produção de matéria seca de fustes de *Eucalyptus grandis* em função da densidade de plantio, tempo de ciclo e energia solar disponível. *Acta Scientiarum. Agronomy*. Maringá, 26(4):437-441, 2004.
- PEREIRA, J. A., RIBEIRO DE AZEVEDO, A., OLIVEIRA SALES, R.; MACHADO PIMENTEL, J. C.; AZEVÊDO ALVES, A.; CASTRO, A. B. Composição química da silagem de capim elefante cv. Napier (*pennisetum purpureum* schum.) com diferentes níveis de leucena cv. cunningham (*leucaena leucocephala* (lam.) de wit.) *Revista científica de produção animal*, vol. 1, no 2 (1999)
- PILLSBURY, N.H.; AYERS N.L. Establishing a Eucalyptus Energy Plantation on the Central Coast of California. Presented at the Workshop on *Eucalyptus* in California, June 14-16, 1983, Sacramento, California. Gen. Tech. Rep. PSW-69. Berkeley, CA: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture; 1983.
- PIMENTAL-GOMES, F.; GARCIA, C.H. Estatística Aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.
- POGGIANI, F.; COUTO, H.T.Z.; CORRADINI, L.; FAZZIO, E.C.M. Exportação de biomassa e nutrientes através da exploração dos troncos e das copas de um povoamento de *Eucalyptus saligna*. *IPEF*, 25:37-39, 1983.
- QUESADA, D.M.; BODDEY, R.M.; REIS, V.M.; URQUIAGA, S. Parâmetros qualitativos de genótipos de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) estudados para a produção de energia através da biomassa. Circular técnica Embrapa. Seropédica, RJ. 4p. 2004.
- QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.D.S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. *Revista da Madeira*, 89:100-106, 2005.
- RAE, A.M.; ROBINSON, K.M.; STREET, N.R.; TAYLOR, G. Morphological and physiological traits influencing biomass productivity in short rotation coppice poplar. *Canadian Journal of forestry Research*, 34:1488-1498, 2004.
- REZENDE, J.L.P.; OLIVEIRA, A.D. *Análise econômica e social de projetos florestais*. 2.ed., revista e atualizada, Viçosa: Editora UFV, 2008. 386p.
- RESENDE, R.R.; VALE, A.B.; SOARES T.S.; SILVA, M.L.; COUTO, L.; VALE, R.S. Emprego de um modelo de crescimento e produção para determinação da rotação em povoamentos de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, 28(2):219-225, 2004.
- ROCHA, M.P.; KLITZKE, R.J.; SANFELICE, E.; FAGION, L.F. A madeira como fonte de energia. *Revista da Madeira*, ABPM - Associação Brasileira de Produtores de Madeira, Curitiba, Ano 2, 1993, n.11, p.26-27.

- RODIGHERI, H.R. Vantagens ecológicas e econômicas de reflorestamentos em propriedades rurais no sul do Brasil. *Proceedings online...* Disponível em: <http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/i_en/mesa5/4.pdf>. Acesso em: 13 out. 2008.
- RONDON, E.V. Produção de biomassa e crescimento de árvores de *Schizolobium amazonicum* (huber) ducke sob diferentes espaçamentos na região de mata. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, 26(5):573-576, 2002.
- REIS, M.G.F.; KIMMINS J.P.; REZENDE G.C.; BAROS N.F. Acúmulo de biomassa em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. *Revista Árvore*, 9(2):149-162, 1985.
- SAMSON, R.; MANI, S.; BODDEY, R.; SOKHANSANJ, S.; QUESADA, D.; URQUIAGA, S; REIS, V.; HO LEM, C. The potential of C4 perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24:461-495, 2005.
- SCHUMACHER, M.V.; CALDEIRA, M.V.W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie maidenii. *Ciência Florestal*, Santa Maria, 11(1)45-53, 2001.
- SCOLFORO, J.R.S.; THIERSCH, C.R. *Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria*. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 285p.
- SCOLFORO, J.R.S. *Biometria florestal: Parte I: modelos de regressão linear e não linear; Parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso seco de matéria seca*. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352p.
- SENELWAA, K., SIMS, R.E.H. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. *Biomass and Bioenergy*, 17:127-140, 1999.
- SEYE, O.; CORTEZ, L.A.B.; GOMEZ, E.O. Queima direta de gramínea Projeto Integrado de Biomassa - PIB.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2003, Campinas. *Proceedings online...* Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000200001&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 13 dez. 2008.
- SEYE, O.; CORTEZ, L.A.B.; GOMEZ, E.O. Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos. In *Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2000, Campinas (SP, Brazil) [online]. 2003. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000200022&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 28 nov. 2009.
- SILVA, M.L.; REZENDE, J.L.P.; LIMA, V.B. J.; CORDEIRO, S.A.; COELHO, L.M. J. Métodos de calculo da terra na atividade florestal. *Cerne*, Lavras, 14(1):75-81, 2008.
- SILVEIRA, R.L.V.A.; GAVA, J.L. Nutrição e adubação fosfatada em *Eucalyptus*. Palestra apresentada no Simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira, realização POTAFOS, 14 a 16 de maio/2003.

- SMEETS, E. M.W.; FAAIJ, A.P.C. The impact of sustainability criteria on the costs and potentials of bioenergy production – Applied for case studies in Brazil and Ukraine, *Biomass and Bioenergy* (2009), doi:10.1016/j.biombioe.2009.11.003.
- SMEETS, E.M.W.; LEWANDOWSKI, I.M.; FAAIJ, A.P.C. The economical and environmental performance of *Miscanthus* and Switchgrass production and supply chains in a European setting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:1230-1245, 2009.
- SOARES, C.P.B.; NETO, F.P.; SOUZA, A.L. Dendrometria e inventario florestal. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 276p.
- STURION, J.A., PEREIRA, J.C.D., CHEMIN, M.S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, (16):55-59, 1988.
- SPANGENBERG, A.; GRIMM, U.; DASILVA, J.; FOÈ LSTER, H.. Nutrient store and export rates of *Eucalyptus urograndis* plantations in eastern Amazonia (Jari). *Forest Ecology and Management*, 80(1-3):225-234, 1996.
- TAMI, E. Cogeração – Biomasse, source d'énergie verte au service de l'industrie et du territoire. Dossier de Presse. *Proceeding online...* Available from: <www.dalkia.fr/ressources/documents/1/454,DP_Tavaux-231009.pdf>. Access on: 26 Nov. 2009.
- TERREAUX, J.P. Estimation de la rentabilité de la culture de certains eucalyptus dans le sud-ouest de la France. *Ann. For. Sci.*, 57 :379-387, 2000.
- TCACENCO, F.A.; BOTREL, M.A. Identificação e avaliação de acessos e cultivares de capim-elefante. In: CARVALHO, M.M.; ALVIN, M.J.; XAVIER, D.F., et al. (Eds) *Capim elefante: produção e utilização*. 2.ed., revisada. Brasília:Embrapa-SPI e Juiz de Fora:Embrapa-Gado de Leite, 1997, p.1- 30.
- TROSSERO, M.A. Wood energy: the way ahead. *Unasylva*, 53(211):3–12, 2002.
- TSUKAMOTO, A.A.; MÜLLER M.D.; COUTO, L. Conteúdo energético e produção de biomassa em sistemas agroflorestais com eucalipto no município de Paracatu, MG. *Proceeding online...* Disponível em: <www.sbsaf.org.br/anais/2006/Biologia_%20Ecologiaservicosambientais/trabalho242.doc>. Acesso em: 24 jun. 2008.
- URQUIAGA, S.; ALVES, B.; BODDEY, R. Capim-elefante: uma nova fonte alternativa de energia. Embrapa Agrobiologia. Seropédica, RJ. *Proceedings online...* Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?Base=../agropecuario/index.html&conteudo=../agropecuario/artigos/capim_elefante.html>. Acesso em: 12 jun. 2008.
- VALE, A.T.; BRASIL, M.A.M.; CARVALHO, C.M.; VEIGA, R.A.A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* hill ex- maiden e *Acacia mangium* willd em diferentes níveis de adubação. *Cerne*, 6(1):83-88, 2000.

- VAN DAM, J.; FAAIJ, A.P.C.; LEWANDOWSKI, I.; FISCHER, G. Biomass production potentials in Central and Eastern Europe under different scenarios. *Biomass and Bioenergy* v. 31 (2007) pp. 345–366
- VAN DEN BROEK, R.; VAN DEN BURG, T.; VAN WIJK, A.; TURKENBURG, W. Electricity generation from eucalyptus and bagasse by sugar mills in Nicaragua: A comparison with fuel oil electricity generation on the basis of costs, macro-economic impacts and environmental emissions. *Biomass and Bioenergy*, 19:311-335, 2000.
- VILLA NOVA, N.A.; MOREIRA, P.R.; BELMONT PEREIRA, A.. Eficiência de captura de energia solar por dosséis de *Eucalyptus pellita* F. Muell sob várias densidades de plantio. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, 11(2):269-274, 2003.
- VILELA, H. Capim-elefante Carajás (Ex. Paraíso) (*Pennisetum hybridum*) *Proceedings online*. Disponível em: <http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigos_capim_elefante_paraíso.htm>. Acesso em: 21 nov. 2009.
- VILELA, H.; CERIZE, D. Capim elefante paraíso na geração de energia. *Proceedings online* Disponível em: <http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigoscapim_elefante_paraíso_geracao_energia.htm>. Acesso em: 24 jun. 2008.
- WIT, M.D., FAAIJ, A. European biomass resource potential and costs. *Biomass and Bioenergy*. Article in Press, 2009.
- YOSHIDA, T.; TURN, S.Q.; YOST, R.S.; ANTAL, M.J. Banagrass vs eucalyptus wood as feedstocks for metallurgical biocarbon production. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47:9882–9888, 2008.
- ZIANIS, D., MUUKKONEN, P., MÄKIPÄÄ, R.; MENCUCCINI, M. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*, Tampere, 4. 2005. 63p.