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

Fluxos de energia em sistemas de produção de forragens

Maria Carolina da Silva Andrea

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

**Piracicaba
2013**

Maria Carolina da Silva Andrea
Engenheira Agrônoma

Fluxos de energia em sistemas de produção de forragens

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **THIAGO LIBÓRIO ROMANELLI**

Dissertação apresentada para obtenção do título
de Mestra em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2013**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Andrea, Maria Carolina da Silva

Fluxos de energia em sistemas de produção de forragens / Maria Carolina da Silva Andrea.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
106 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Biomassa 2. Balanço energético 3. Sustentabilidade 4. Energia incorporada
5. Campos Gerais I. Título

CDD 636.0855
A556f

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

*Aos meus pais,
Márcia Sueli da Silva Andrea e
Mauro Andrea,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais, por todo o apoio e amor incondicional em todo o meu caminho.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pelas oportunidades oferecidas no curso de Graduação e Pós-Graduação.

A CAPES pela bolsa de estudos.

Ao professor e orientador, Thiago L. Romanelli, pela orientação e amizade.

Aos amigos do PPGESA, em especial Rafael Tieppo, Giancarlo Rocco, Fernanda Souza, Erik Barreto, Nelson Franco, João Paulo Veiga, Mark Spekken.

A segunda família, em Piracicaba, República Atentado, por anos de aprendizado e alegrias.

Aos professores do PPGESA, Marcos Milan, José Paulo Molin.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas.

A Fundação ABC.

A todos que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO.....	9
RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Panorama energético mundial	21
2.2 Panorama energético brasileiro	22
2.3 Energia e seu uso em sistemas agrícolas	25
2.4 Biomassa como fonte de energia	25
2.4.1 Definição e classificação	25
2.4.2 Uso energético da biomassa	27
2.4.3 Sustentabilidade do uso da biomassa como fonte de energia.....	29
2.4.4 Composição da biomassa para fins energéticos	30
2.5 Análises de fluxos de energia	32
2.5.1 Fluxos de Materiais	35
2.5.2 Determinação da energia de entrada (EE)	37
2.5.3 Determinação da energia de saída (ES).....	37
2.5.4 Indicadores de eficiência energética.....	38
2.5.4.1 Balanço energético (BE)	40
2.5.4.2 Energy Return Over Investment (EROI)	41
2.5.4.3 Energia Incorporada (EI)	43
2.5.5 Panorama energético mundial de forrageiras usadas para alimentação no Brasil.....	44
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	49
3.1 Localização das áreas de estudo	49
3.2 Sistemas de produção avaliados	50
3.3 Operações avaliadas	51
3.4 Fluxo de Materiais	55

3.4.1 Insumos indiretamente aplicados	55
3.4.1.1 Combustível.....	55
3.4.1.2 Depreciação do Maquinário	56
3.4.2 Insumos diretamente aplicados	56
3.5 Fluxos de energia nos sistemas	58
3.5.1 Determinação da Energia de Entrada (EE)	58
3.5.2 Determinação da Energia de Saída (ES)	58
3.6 Indicadores de eficiência energética	60
3.6.1 Balanço Energético (BE)	60
3.6.2 Energy Return Over Investment (EROI)	60
3.6.3 Energia Incorporada (EI)	61
3.7 Análise de sensibilidade.....	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1 Fluxo de materiais.....	63
4.2 Fluxos de energia	68
4.2.1 Energia de Entrada (EE)	68
4.3 Energia de saída (ES).....	72
4.4 Indicadores de eficiência.....	74
4.4.1 Balanço Energético (BE)	74
4.4.2 EROI	76
4.4.3 Energia Incorporada (EI)	77
4.5 Análise de sensibilidade.....	78
5 CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS.....	83
ANEXOS	95

RESUMO

Fluxos de energia em sistemas de produção de forragens

No cenário mundial atual, em que é observado o aumento da população, da demanda por alimentos e da utilização de energia, também é observada a busca por fontes de energia alternativas às fósseis, diminuindo a dependência e risco econômico e ambiental oriundo de seu uso exclusivo. A análise de fluxos de energia possibilita uma avaliação da sustentabilidade de sistemas de produção agrícola, que visa o uso eficiente de insumos em termos energéticos. Essas análises também permitem identificar culturas como fonte de bioenergia, além de poderem ser utilizadas como complemento às análises econômicas, na busca por sistemas de produção mais eficientes. Esse estudo teve como objetivo apresentar uma análise do uso de insumos e energia, bem como a sua eficiência, em sistemas de produção de plantas forrageiras, tradicionalmente utilizadas para alimentação animal, na região dos Campos Gerais, Paraná. Foram determinados o fluxo de materiais (FM), demanda (EE) e disponibilização de energia (ES), balanço energético (BE), lucratividade energética (EROI) e energia incorporada (EI) da biomassa foram aplicados nesses sistemas. O FM determinou o consumo de insumos por área, e serviu de base para o cálculo da EE dos sistemas. Com características das culturas, calculou-se a ES, e com base nesses parâmetros, calculou-se os indicadores BE, EROI e EI. Com base nos resultados, concluiu-se que as culturas que se apresentaram mais eficientes do ponto de vista energético foram as gramíneas perenes, cultivares de *P. maximum* e Tifton 85, e as gramíneas anuais, milho e sorgo, pois apresentaram os melhores valores de indicadores da eficiência energética (ES, BE, EROI e EI), o que justificaria uma posterior investigação detalhada no uso energético dessas culturas. As culturas da aveia, azevém, cevada e milheto apresentaram os valores menos favoráveis no enfoque energético, portanto não adequadas à finalidade energética em relação às demais culturas estudadas. A operação que apresentou maior demanda de energia foi a distribuição de fertilizantes, devido aos insumos aplicados (mais que 47% da demanda total de todas as operações realizadas nas culturas). Os insumos que apresentaram maiores demandas de energia (mais de 57% do total) nos sistemas foram os fertilizantes, seguidos do diesel. Destacou-se o uso do fertilizante nitrogenado que representou mais de 50% da demanda total de energia em todos os sistemas de produção. O EROI para as cultivares de *P. maximum*, Tifton 85, milho, sorgo, milheto, azevém, cevada e aveia, foram: 14,2; 13,7; 10,1; 8,9; 7,2; 5,0; 4,6 e 3,8, respectivamente.

Palavras-chave: Biomassa; Balanço energético; Sustentabilidade; Energia incorporada; Campos Gerais

ABSTRACT

Energy flows in forage production systems

In the current world scenario, in which is observed the increase in population, demand for food and energy use, it is also observed the search for alternative energy sources to fossil fuels, decreasing dependence and environmental and economic risk arising from your use. Energy flows analysis enables an assessment of the sustainability of agricultural production systems, aiming the efficient use of inputs in energy terms. These analysis can also identify crops as a bioenergy source, and can be used as a complement to economic analysis, in the search for more efficient production systems. This study aimed to present an analysis of the use of inputs and energy, as well as its efficiency, in forage production systems, traditionally used for food, in the region of Campos Gerais, Paraná. Material flow (MF), demand (ED) and energy availability (EA), energy balance (EB), energy profitability (EROI) and embodied energy (EE) of biomass were calculated for all the systems. MF determined the inputs use per area, and was basis for the ED determination. With crop characteristics, EA was obtained, and based on these parameters, the indicators EB, EROI and EE were determined. Based on the results, it was concluded that the crops that were more efficient in energy terms were the perennial grasses, *P. maximum* cultivars and Tifton 85, and the annual grasses, maize and sorghum, since they presented the best values in the used energy indicators (EA, EB, EE and EROI), which would justify a further detailed investigation concerning the energy use of these crops. Oats, rye, barley and millet showed less favorable values, therefore not suitable for energy purposes in relation to other studied crops. The mechanized operation with the highest energy demand was the fertilizer distribution due to applied inputs (more than 47% of the total energy demand of all operations performed in cultures). The inputs that presented higher energy demand (more than 57% of the total) were fertilizers, followed by diesel, in all production systems. The use of nitrogen fertilizer is emphasized, since it represented over 50% of total energy demand in all production systems. The EROI for the cultivars of *P. maximum*, Tifton 85, maize, sorghum, millet, rye, barley and oats, were 14.2, 13.7, 10.1, 8.9, 7.2, 5.0, 4.6 and 3.8, respectively.

Keywords: Biomass; Energy balance; Sustainability; Embodied energy; Campos Gerais

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fornecimento de energia primária total mundial. Adaptado de International Energy Agency (2012).	21
Figura 2 - Consumo final total de energia no mundo. Adaptado de: IEA, 2012.	22
Figura 3 - Fornecimento de energia primária por fonte. Adaptado de EPE, 2012.	23
Figura 4 - Consumo setorial da biomassa em 2011. Adaptado de: EPE (2012).	24
Figura 5 - Biomassa e as rotas de obtenção de seus produtos. (Adaptado de Cortez; Lora e Gómez, 2008).	26
Figura 6 - Principais tipos de rotas de conversão da biomassa em formas secundárias de energia. (Adaptado de: VENTURI; VENTURI, 2003).	32
Figura 7 - Localização da região dos Campos Gerais, no estado do Paraná, Brasil.	49
Figura 8 - Algoritmo utilizado na avaliação dos fluxos de energia dos sistemas de produção. Adaptado de: Romanelli; Milan (2010b).	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Culturas avaliadas e suas características	50
Tabela 2 - Características dos equipamentos e insumos usados nas operações avaliadas dos sistemas de produção	54
Tabela 3 – Utilização de fertilizantes, calcário e sementes nas culturas	57
Tabela 4 - Utilização de defensivos nas culturas.....	57
Tabela 5 – Composição dos componentes estruturais na matéria seca das culturas avaliadas	60
Tabela 6 - Fluxo de materiais dos insumos utilizados nos sistemas de produção avaliados	63
Tabela 7 – Fluxo de materiais do combustível nas operações mecanizadas dos sistemas de produção avaliados	64
Tabela 8 – Fluxo de materiais dos insumos incorporados na biomassa produzida	66
Tabela 9 - Fertilizantes utilizados nos sistemas de produção avaliados.....	67
Tabela 10 - Demanda de energia de entrada dos sistemas avaliados.	68
Tabela 11 - Participação dos insumos na demanda total de energia dos sistemas de produção	69
Tabela 12 – Participação dos fertilizantes na demanda total de energia dos sistemas de produção	70
Tabela 13 – Participação das operações mecanizadas na demanda total de energia dos sistemas de produção	71
Tabela 14 - Componentes estruturais e potencial energético disponibilizado na matéria seca das culturas avaliadas	72
Tabela 15 - Indicadores de eficiência do uso da energia nos sistemas de produção	74
Tabela 16 – Análise de sensibilidade de operações mecanizadas	79

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial e o consequente aumento da demanda de bens de consumo foi um fator que colaborou para um aumento de aproximadamente 110% no dispêndio total de fontes de energia (fósseis e renováveis) entre os anos de 1973 e 2010 (IEA, 2012).

Nas últimas décadas ocorreu uma mudança na maneira do uso das fontes renováveis, devido ao desenvolvimento de tecnologias de conversão. Entre as referidas fontes, o uso da biomassa se deu por meio do desenvolvimento de rotas alternativas a já tradicionalmente utilizada combustão, como os processos de digestão, fermentação, gaseificação, esterificação e pirólise. No Brasil, a biomassa representa aproximadamente 25% do fornecimento total de energia primária da matriz energética, (EPE, 2012).

O uso da biomassa vem sendo proposto como uma opção para complementação e substituição do uso de fontes fósseis, proporcionando assim, maior segurança política e econômica, relacionada ao uso e dependência exclusivos de fontes fósseis e seus países exportadores. A biomassa também vem sendo apontada como uma opção com benefícios ambientais, relacionado à emissão de gases do efeito estufa. A utilização da biomassa se dá por meio de resíduos orgânicos, biofluidos, vegetais herbáceos e lenhosos, sendo que os dois últimos podem ser usados ou por meio de seus resíduos, ou por meio da biomassa cultivada exclusivamente ao uso energético.

No Brasil, o uso da biomassa para fornecimento de energia é principalmente representada pela cana-de-açúcar e pelo eucalipto. Identifica-se, contudo, a importância de estudos e avaliações de ordem energética de outras culturas (culturas regionais) mesmo quando já tradicionalmente utilizadas na alimentação. Dessa maneira, permite-se a adoção de visão com enfoque ambiental, complementando o enfoque econômico, impulsionada pela crescente busca de maior sustentabilidade dos sistemas de produção.

Nas análises energéticas, quantifica-se a demanda, disponibilização de energia e eficiência energética de um sistema e de seus fatores de produção, além da possível identificação de fonte de biomassa para fornecimento de energia renovável. Com a identificação de cultura promissora na finalidade energética, destaca-se a importância de medidas de manejo, como seu cultivo em áreas marginais à produção de alimentos e solos em estado de degradação. Com isso, evita-se a competição com a produção de alimentos, e possibilita-se a complementação do fornecimento de energia regional, desde que de acordo com as necessidades e possibilidades locais de ordem econômica, social e ambiental, que por

sua vez ainda possibilita o aumento da competitividade entre as fontes alternativas renováveis de energia.

Além de características regionais, fatores como o ciclo da cultura, composição estrutural, produtividade e uso de insumos, possuem influência direta na escolha agronômica de uma cultura para uso energético. A análise destes fatores deve ser cuidadosamente analisada para definição das medidas de manejo adequadas às necessidades regionais, juntamente com os parâmetros energéticos relativos ao uso e disponibilização de energia (uso final e rota de conversão mais adequada).

As culturas forrageiras, que atualmente são alvos de pesquisas na área de bioenergia, podem ser utilizadas no fornecimento de energia por meio de métodos como combustão, biodigestão, entre outros. O estado do Paraná possui destaque nacional na produção agrícola, (CONAB, 2012; SEAB, 2012a), sendo que na região dos Campos Gerais também são observados altos índices de produtividade de forrageiras e cereais (NETO; ROCHA, 2007), tradicionalmente cultivadas para alimentação. As análises energéticas aplicadas a essas culturas podem, além de oferecer medida complementar de manejo, identificar possíveis alternativas no fornecimento de energia renovável.

Dessa maneira, o objetivo do trabalho é caracterizar a demanda de energia e avaliar o potencial energético de culturas forrageiras em sistemas de produção de biomassa nos Campos Gerais do Paraná.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Panorama energético mundial

Com o aumento da população mundial de um bilhão de pessoas entre 1999 e 2011, juntamente com a previsão de serem atingidos os 9,3 bilhões na metade do século XXI, observa-se a previsão do aumento da demanda por alimentos (FAO, 2011), do desenvolvimento tecnológico, e o consequente aumento do consumo de energia (HALL, 2004; MUSANGO; BRENT, 2011; UNFPA-ONU, 2011).

Observa-se na Figura 1, que entre ano de 1973 e 2010, ocorreu um aumento de 108% no fornecimento total de energia no mundo, em EJ¹, (de 6.107 para 12.717 Mtep²), 94% no fornecimento oriundo de fontes fósseis (incluem petróleo, gás natural, carvão e turfa, de 5.295 para 10.313 Mtep) e 98% no fornecimento oriundo de biocombustíveis e resíduos (incluem fontes líquidas, sólidas, gasosas, de resíduos industriais e domésticos, de 641 para 1.271 Mtep).

Figura 1 – Fornecimento de energia primária total mundial. Adaptado de International Energy Agency (2012)

Já o consumo final de energia é definido como aquele obtido após o desconto da energia utilizada no processo de transformação, para formas prontamente utilizáveis. Cita-se como exemplo de formas finais de utilização de energia o etanol, a eletricidade, e o diesel. O

¹ 1 EJ = 10^{18} Joules.

² 1 tep = $41,9 \cdot 10^9$ Joules; 1 Mtep = $41,9 \cdot 10^{15}$ Joules.

consumo final total mundial entre 1973 e 2010 apresentou um aumento de 85% (de 4.672 para 8.677 Mtep). As fontes fósseis apresentaram aumento de 62% (de 3.541 para 5.744 Mtep) e os biocombustíveis e resíduos apresentaram aumento de 78 % (de 617 para 1.102 Mtep (Figura 2).

Figura 2 - Consumo final total de energia no mundo. Adaptado de: IEA, 2012

Nota-se, portanto, que as fontes fósseis representam a maior parte do fornecimento de energia na média mundial. Observa-se ainda, a consolidação mundial do uso da biomassa como fonte de energia, mesmo que ainda não significativo como no Brasil. Exemplifica-se esse fato com a crescente preocupação com o ambiente e os impactos da alta taxa de utilização de combustíveis fósseis.

2.2 Panorama energético brasileiro

O Brasil vive uma situação única no uso da bioenergia em relação à maior parte dos países no mundo, no que tange o uso de fontes renováveis de energia, com mais de 45% do fornecimento interno de energia primária, em comparação com os 13,3% da média mundial (IEA, 2012). Do fornecimento total de energia, 14% têm como fonte a energia hidráulica, 29% são oriundos de biomassa (cana-de-açúcar com 16%, e lenha e carvão vegetal com 10%) e 4% oriundos de outras fontes renováveis (EPE, 2012). Nota-se, portanto, a importância do uso da biomassa na matriz energética nacional. Fatores como a grande extensão territorial, condições edafoclimáticas favoráveis a espécies como a cana-de-açúcar, fatores de ordem econômica e política que incentivam essa produção, indicam que a biomassa continuará a

possuir importante participação na matriz energética nacional (LEAL; WALTER; SEABRA, 2012). O uso dessas fontes de biomassa já consolidadas no país apresenta outras vantagens, como a menor emissão de gases de efeito estufa em relação às fontes fósseis, e benefícios de ordem sócio-econômica (GOLDEMBERG, 2007; WALTER et al., 2011). Observa-se na Figura 3, a composição da matriz energética brasileira, em relação ao fornecimento de energia primária, por tipo de fonte.

Figura 3 - Fornecimento de energia primária por fonte. Adaptado de EPE, 2012

Observa-se que as fontes não renováveis (composta principalmente por petróleo, gás natural e carvão) representam a maior parte do fornecimento de energia primária no país, com 55% do total. Os 45% relativos ao fornecimento energético por fontes renováveis, apesar de inferior ao fornecimento energético por fontes fósseis, ainda é bastante superior em relação à média mundial (10% do fornecimento primário total, IEA, 2012). Com relação às fontes renováveis, nota-se que as fontes de biomassa, juntas, totalizam mais da metade (27%) da participação das fontes de energia renováveis no fornecimento primário.

A composição setorial do consumo final de biomassa (incluindo bagaço de cana-de-açúcar, lenha e outras fontes primárias renováveis, como o álcool e o carvão vegetal) no ano de 2011 pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Consumo setorial da biomassa em 2011. Adaptado de: EPE (2012)

De acordo com a EPE (2012), observa-se que o setor industrial, com 53%, é o maior consumidor da biomassa para produção de energia. O fato é evidenciado pelo uso da biomassa (representada principalmente pelo bagaço da cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal) no suprimento de energia em indústrias de papel e celulose, cimento, mineração, metalúrgica, química, têxtil, de alimentos e bebidas, entre outras. O setor energético e o de transportes também possuem participação no consumo da biomassa. O setor energético é aquele composto pelas indústrias responsáveis por toda a cadeia envolvendo a extração, disponibilização e comercialização da energia. O setor de transportes, composto pela frota nacional de veículos, possui participação devido ao uso de etanol amplamente difundido entre os veículos do país, utilizado ou misturado à gasolina, ou na forma anidra, ou diretamente na forma hidratada. O setor agropecuário (que engloba ao uso da energia para realização das atividades agrícolas) por sua vez é responsável por apenas 4% do consumo final da biomassa. A biomassa como fonte de energia possui, portanto, influência direta nos principais setores da sociedade. A composição apresentada na Figura 4 se refere ao bagaço de cana-de-açúcar, lenha e outras fontes primárias renováveis, como o álcool e o carvão vegetal. Salienta-se a possibilidade do aumento do uso da biomassa como fonte de energia, por meio de culturas dedicadas³ ou de resíduos culturais para suprir o fornecimento local (CARPENTIERI et al., 1993; FELFLI et al., 2011).

³ Cultura dedicada = aquela que é cultivada exclusivamente com a finalidade energética (PÉREZ et al., 2011).

2.3 Energia e seu uso em sistemas agrícolas

A energia em todas as suas formas (mecânica, térmica, radiante, química, nuclear) possui grande importância na sociedade, ela é necessária para a produção de bens e serviços a partir dos recursos naturais, e para o fornecimento de inúmeros serviços da sociedade (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

Com relação às fontes de energia mais usadas no mundo, as fósseis, em sua trajetória de uso e comercialização, observa-se no início do século XX um contínuo crescimento de seu uso, e consequente dependência dessas como principais fontes de energia. Fatores de ordem política, contudo, culminaram nas crises do petróleo, durante a década de 70, na qual houve aumento do preço desta fonte de energia no mercado mundial. Em outras ocasiões históricas, notadamente marcadas pela instabilidade política entre grandes países produtores e exportadores, ocorreram aumentos do preço do combustível também nas últimas décadas (ADELMAN, 2002; TVERBERG, 2012). Nota-se, portanto, que o preço do combustível é instável e sujeito a inúmeros fatores de ordem política e econômica, sujeitos a acontecerem em todo o mundo. Após esses marcos históricos, observou-se uma preocupação com a busca por novas fontes de energia, e que atingiu também o setor agrícola, visto a influência direta da crise nos preços de insumos industrializados (fertilizante e combustível).

Na agricultura, o aumento da produção está diretamente relacionado com o desenvolvimento de novas variedades e uso mais intenso de insumos (fertilizantes e defensivos) e da mecanização. Todos esses insumos, por sua vez, dependem principalmente do uso de energia fóssil, visto que a quantidade de energia usada nas operações depende de outros fatores que não somente a energia contida no combustível, como a energia incorporada na fabricação e distribuição das máquinas, fertilizantes, defensivos, trabalho humano e outros (PIMENTEL, 1980). Sendo assim, a energia, em forma prontamente disponível, ou embutida em produtos, desempenha importante papel na produção agrícola.

2.4 Biomassa como fonte de energia

2.4.1 Definição e classificação

O termo biomassa, para fins energéticos, descreve todos os vegetais, algas, plantas aquáticas e seus derivados, madeira, resíduos animais, industriais e urbanos, lodo de tratamento biológico de efluentes, além de resíduos de origem animal e de processamento de

alimentos que podem ser convertidos em energia útil (DEMIRBAS; BALAT; BALAT, 2009; INNOCENTE, 2011). A energia disponibilizada a partir dessa biomassa é conhecida como energia “verde” ou bioenergia.

A biomassa pode ainda ser classificada como primária (oriundo dos vegetais, incluindo resíduos de colheita), secundária (oriundos do processamento industrial) ou terciária (oriundos do final dos processos industriais, e resíduos urbanos) (FAAIJ, 2006). Observa-se na Figura 5, esquema das formas de biomassa e seus produtos.

Figura 5 - Biomassa e as rotas de obtenção de seus produtos. (Adaptado de Cortez; Lora e Gómez, 2008)

Na atividade agropecuária, grande importância tem sido dada a novas fontes de energia, como a biomassa, e às tecnologias de conversão alternativas, com o objetivo de racionalizar o uso de energia.

A crescente busca por fontes de energia alternativas às fósseis tem levado muitos países à busca do uso da biomassa para essa finalidade (WRIGHT, 2006). Essa fonte de energia é considerada por diversos autores como uma opção com potencial de crescimento para uso como combustível no suprimento futuro de energia (DEMIRBAS et al., 2009; McKENDRY, 2002a; SAIDUR et al., 2011). Seu uso ainda vem sendo proposto como opção para atender uma possível escassez futura de energia de origem fóssil, além de representar uma opção mais segura do ponto de vista político e econômico em relação às essas (DEMIRBAS et al., 2009; FAAIJ, 2006). Koh e Hoi (2003) afirmam que existe a necessidade para a produção de biomassa de maneira sustentável, como o uso da biomassa dedicada em áreas desmatadas e excedentes, porém considerando a futura exigência de áreas para produção de alimentos.

Observam-se, no Brasil, algumas etapas distintas na evolução do uso da biomassa como fonte de energia. É possível observar um processo de transição no âmbito energético, que se iniciou com o uso de baixa tecnologia, conhecido como “biomassa convencional”, que inclui, por exemplo, o uso de lenha para uso doméstico, e está avançando para “biomassa moderna”, que está relacionado como uso da biomassa para geração de calor e eletricidade industriais, além do uso como combustível, como etanol de primeira geração, e potencialmente como etanol de segunda geração (LORA; ANDRADE, 2009).

Embora diversos estudos abordem a produção e uso energético da biomassa, as avaliações ambientais que abordam o processo de obtenção de energia em escala comercial, até seu uso final, são escassas. No Brasil observa-se maior quantidade de estudos relacionando o uso da cana-de-açúcar (MACEDO, 1998; LEAL et al., 2012) e do eucalipto (BRITO; CINTRA, 2004; ROMANELLI; MILAN, 2010a) como fontes de energia em relação a outras culturas, como forrageiras e cereais, sendo esses resultados ainda escassos (CASTANHO FILHO; CHABARIBERY, 1983; CARMO; COMITRE, 1991; CAMPOS, 2001). A busca de informações e a ponderação na pesquisa da biomassa para energia é dificultada pelas contrastantes tendências ideológicas, que tornam esse tipo de análise complexa. Além disso, a validação de resultados extrapolados, obtidos primeiramente ao nível de uma pequena planta ou área para a sociedade, raramente tem sido feita de maneira explícita (ULGIATI, 2001).

2.4.2 Uso energético da biomassa

Em termos mundiais, o uso potencial da biomassa (de todas as formas de resíduos, portanto, excluindo-se somente a biomassa dedicada) é estimado em torno de 80 EJ, porém pesquisas são necessárias para a determinação de quanto desse potencial teórico pode ser utilizado de maneira sustentável e econômica (BLASCHEK; EZEJI; SCHEFFRAN, 2010).

Com relação à biomassa de vegetais, seu uso pode ser feito ou por meio de seus resíduos (como bagaço, palha, hastes, material fibroso) ou pelo uso da planta inteira (biomassa dedicada) (AZAR; LARSON, 2000).

Os resíduos culturais podem ser definidos como as partes não comestíveis da planta, e/ou que são deixadas no campo após a colheita. Pode também ser incluído nessa categoria o material oriundo das etapas de processamento da matéria-prima (e.g. bagaço da cana-de-açúcar). Os resíduos culturais são materiais que variam muito entre culturas, por meio de quantidade, composição e outras características, como a decomposição, porém encontram-se

em estudos, meios de estimar a produção anual desse material (LAL, 2005). O uso de resíduos deve ser cuidadosamente avaliado, pois há culturas que disponibilizam maior quantidade de resíduos, como a cana-de-açúcar, o milho e o sorgo, possibilitando assim a retirada do material para uso energético, sem que haja comprometimento da qualidade do solo. Porém culturas como a soja, que disponibilizam menor quantidade de resíduos, implicam na importância de se deixar os resíduos no campo, para fins da manutenção da qualidade do solo (BLASCHEK; EZEJI; SCHEFFRAN, 2010).

No Brasil, o maior exemplo do uso de resíduos culturais como fonte de energia, é o processo de cogeração (disponibilizando calor e energia elétrica), realizado pela queima do bagaço da cana-de-açúcar, que por sua vez permite o suprimento de energia para a cadeia do açúcar e etanol das próprias usinas (SEABRA; MACEDO, 2011). A cogeração pode se tornar particularmente importante em países de grande extensão e altos níveis de produção agrícola e florestal, portanto, que possuem maior disponibilidade da biomassa.

Em relação às culturas dedicadas, essas podem ser herbáceas, ou lenhosas de ciclo curto. As herbáceas em geral são gramíneas que podem ser colhidas como massa verde ou como feno, enquanto as lenhosas de ciclo curto são espécies usadas exclusivamente para a finalidade energética (como o eucalipto) (FILHO; BADR, 2004).

No cultivo da biomassa dedicada, existem algumas características que tornam essas culturas mais adequadas a esse uso, como a alta produtividade, o baixo uso de insumos, o baixo custo, a composição com baixo índice de contaminantes e a baixa demanda nutricional, sendo que todas essas características são também dependentes do clima e solo do local (McKENDRY, 2002a).

Aponta-se como uma vantagem do uso da biomassa dedicada, seu uso contribuindo com a manutenção da fertilidade do solo em áreas marginais, em estágio de degradação ou improdutivas, e possibilitando o sequestro de carbono (LAL, 2005; McLAUGHLIN; KSZOS, 2005), ambos devido ao cultivo de gramíneas e lenhosas (de ciclo curto) que apresentam altos níveis de produtividade e baixo uso de insumos. O uso da biomassa dedicada pode, entretanto, apresentar desvantagens, como a alta dependência do uso de maquinário, combustível e mão de obra no manejo, que por sua vez podem onerar o custo e consumo de energia dessas culturas; a competição de áreas com o cultivo de culturas para alimentação e a remoção de nutrientes do solo (ANSELMO FILHO; BADR, 2004).

A biomassa, mesmo quando convencionalmente usada na alimentação, é passível de ser avaliada para um possível uso energético. Toma-se como exemplo a produção de milho nos EUA, que inicialmente era destinada somente à alimentação, e atualmente a produção de

etanol do grão é a maior do mundo (FAO, 2012), com mais de 40% da produção da cultura destinada ao etanol (KLOPFENSTEIN; ERICKSON; BERGER, 2012). O uso energético da biomassa, contudo, deve atender não apenas às necessidades de ordem técnica, mas também de ordem econômica, social e ambiental.

2.4.3 Sustentabilidade do uso da biomassa como fonte de energia

O uso da biomassa como fonte de energia, abrangendo todas as etapas do processo, como desenvolvimento da cultura, processamento e conversão do material, deve ser feito de maneira eficiente. Do ponto de vista da sustentabilidade, os processos de produção devem ser favoráveis do ponto de vista energético/ambiental, social e econômico (ELAURIA et al., 2003)

As barreiras de ordem energética, considerada um enfoque ambiental, relacionam-se com a emissão de gases do efeito estufa, como o CO₂, (frequentemente citada como um dos maiores problemas relativos ao uso de fontes fósseis) que por sua vez é ligada à questão de mudanças climáticas, amplamente abordadas atualmente (GUSTAVSSON et al., 2007; BRYAN; KING; WANG, 2010; DHILLON; WUEHLISCH, 2013). O Tratado de Kyoto (prorrogado até 2020, porém apenas com a participação de países responsáveis por 15% das emissões totais, COP 18) evidencia essa preocupação mundial, visto que conta com o comprometimento de países industrializados em reduzir a emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa, em especial o CO₂ (LORA, 2009) que vem aumentando. Do ano de 1973 até o ano de 2010, ocorreu um aumento de 93% na emissão de CO₂. Sabe-se que as fontes fósseis de energia contribuem com a emissão de gases do efeito estufa, devido à liberação de carbono (retido em material de origem vegetal ou animal, durante milhões de anos). Já a bioenergia oriunda de fontes de biomassa, não contribui com essa adição (ABBASI; ABBASI, 2010) visto que quando usada como combustível, (seja por meio da queima ou transformação em combustíveis líquidos, como o etanol) libera para a atmosfera apenas o carbono que o próprio vegetal utilizou durante o processo fotossintético. Ressalta-se, contudo, que durante o processo de transformação e produção de bioenergia oriunda de fontes como a biomassa, existe a utilização de fontes fósseis em etapas do processo de produção e distribuição, como o transporte (SAIDUR et al., 2011).

As barreiras de ordem social relacionam-se principalmente com disponibilidade de área e sua relação com as áreas destinadas à produção de alimentos. A disponibilidade de área possui importância visto que limita as áreas onde se pode dar esse tipo de produção. Áreas

para plantio representam um recurso finito e objeto de competição para múltiplos usos. Ao se atribuir o uso de uma área para a produção de energia, deve-se considerar o seu custo em relação a outros tipos de uso. O aumento do uso da bioenergia nas últimas décadas pode levar a uma mudança no padrão do uso de áreas agricultáveis, ao se alocar maior quantidade de áreas utilizadas para produção de alimento na produção de energia (RATHMANN; SZKLO; SCHAFFER, 2010). Essa questão é controversa, pois a produção de bioenergia pode ser oriunda de resíduos culturais (não utilizando para isso áreas exclusivas) (BLASCHEK; EZEJI; SCHEFFRAN, 2010) ou de culturas dedicadas, porém conduzidas em áreas marginais e com algum estágio de degradação, que não seriam utilizadas na produção de alimentos, e assim, não oferecendo competição (LIU et al., 2011).

As barreiras de ordem econômica estão relacionadas com a disponibilidade de recursos para financiar o estabelecimento, desenvolvimento, da produção de biomassa. É necessário, também, considerar o seu custo em relação a outros tipos de uso da área. Barreira de grande importância em países em desenvolvimento, nos quais os recursos financeiros são mais limitados. Já as barreiras de ordem política estão relacionadas com os incentivos do governo na utilização da biomassa como fonte de energia.

Esse conjunto de três fatores, porém, não são suficientes na determinação da sustentabilidade de um sistema energético. Observa-se a importância de dois outros fatores: o político e o estratégico. Para exemplificá-los, toma-se como exemplo o surgimento e estabelecimento do uso do etanol da cana-de-açúcar no Brasil, e etanol do milho, nos EUA. Ambos representam as duas maiores produções mundiais desse combustível, e demonstram a importância e força dos componentes político e estratégico na adoção de fonte alternativa de energia. Conclui-se, portanto, que os cinco fatores citados (ambiental, social, econômico, político e estratégico) apresentam adequação aos princípios de sustentabilidade de sistemas energéticos (ROMANELLI, 2009).

2.4.4 Composição da biomassa para fins energéticos

A composição da biomassa é característica importante a ser analisada, visto que pode influenciar amplamente no seu poder de disponibilização de energia. Nesse quesito, os parâmetros mais importantes a serem avaliados no material são a composição estrutural, a composição elementar, a composição imediata e as cinzas, seja ele destinado à combustão, ou a processos bioquímicos (como a produção de etanol) (ROMANELLI; RAUCCI, 2011).

A composição estrutural, que possui grande importância na análise do poder calorífico da biomassa, refere-se ao conteúdo, principalmente, de celulose, hemicelulose e lignina (presentes em maior quantidade) e também ao conteúdo de proteínas, açúcares simples, amido e lipídeos. A composição elementar é o conteúdo de massa de carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio, nitrogênio, umidade e material residual (cinzas), sendo que esta é determinada de acordo com norma técnica. É apontado que esse tipo de composição é a característica técnica mais importante do combustível, já que constitui a base para análise dos processos de combustão, como a determinação de seu poder calorífico (ROMANELLI; RAUCCI, 2011).

A composição imediata é representada pelo conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo, voláteis, umidade e cinzas, e esta é também determinada de acordo com norma técnica. Esse tipo de composição tem papel importante durante a ignição e as etapas iniciais da combustão da biomassa (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

O poder calorífico é uma característica da biomassa que indica a quantidade de energia liberada em forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa de um combustível, em unidade de energia por unidade de massa. Há o poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico superior (PCS), sendo que a diferença entre estes dois (PCS-PCI) é a energia requerida para a evaporação da água presente no material combustível e a água de formação obtida a partir da oxidação do hidrogênio do combustível (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). Há ainda a correlação entre o poder calorífico e o teor de lignina: quanto maior o conteúdo de lignina, maior o poder calorífico do material em questão (ROMANELLI; RAUCCI, 2011).

Ressalta-se, portanto, a importância da análise da composição da biomassa, para a escolha mais adequada do processo de conversão. A conversão da matéria-prima é também etapa importante na obtenção de energia da biomassa. Esse processo pode se dar principalmente por meio de rotas termoquímicas e biológicas (Figura 6). A conversão biológica abrange os processos de digestão e fermentação. Já a conversão termoquímica abrange os processos de combustão, gaseificação, pirólise e liquefação. Existe ainda a rota responsável pela extração de óleos. A escolha por cada uma dessas rotas de conversão depende de fatores como a quantidade e qualidade da biomassa disponível, o produto final desejado (combustível líquido, gasoso), padrões e leis ambientais e condições econômicas locais (SAIDUR et al., 2011).

Figura 6 - Principais tipos de rotas de conversão da biomassa em formas secundárias de energia. (Adaptado de: VENTURI; VENTURI, 2003).

O fator econômico, contudo, influencia fortemente na escolha pelo processo de conversão, visto que muitas das tecnologias disponíveis ainda representam alto custo em relação ao uso de fontes fósseis (SAIDUR et al., 2011).

2.5 Análises de fluxos de energia

A definição mais utilizada de análises energéticas é aquela proposta pela Federação Internacional de Institutos para Estudos Avançados (IFIAS, 1974), na qual é definida como sendo o processo de determinação de toda a energia requerida diretamente e indiretamente para que um sistema possa produzir um bem ou serviço (HERENDEEN, 2004; FRANZESE et al., 2009; AGOSTINHO ; ORTEGA, 2012;). De uma maneira geral, esse tipo de análise é feito quantificando a disponibilidade e uso de estoques de combustíveis fósseis (também chamados de energia “adquirida” ou “comercial”). Podem ser contabilizadas fontes de

energia renováveis, porém para uma contabilização mais detalhada e precisa, é necessário manter separadas as fontes renováveis das não renováveis (HERENDEEN, 2004).

O uso de análises energéticas em processos de produção existe há poucas décadas. Inicialmente, essa ferramenta era utilizada para o suporte de decisões específicas, como políticas particulares. Porém a partir da década de 1970, o conceito e prática de desenvolvimento sustentável vêm aumentando nas inúmeras classes de discussão a nível mundial. Houve, portanto, a partir daí a tentativa inicial de apresentar análises tecnológicas (como a de uso de energia) no contexto de desenvolvimento sustentável (MUSANGO; BRENT, 2011).

Mesmo com a importância dos parâmetros econômicos em quaisquer sistemas de produção, quando se trata da busca por maior sustentabilidade, juntamente com as análises econômicas, podem-se utilizar as análises de enfoque energético como ferramentas para a definição do comportamento dos sistemas de produção agrícola (ORTIZ-CAÑAVATE; HERNANZ, 1999). O uso da energia, porém, é mais importante do que apenas o valor (econômico) consegue implicar. Seu uso é um indicador de impacto ambiental de primeira ordem adequado; conseguem abranger efeitos indiretos (como a comparação entre a produção de energia por determinada tecnologia e a energia requerida para a produção dos insumos desse sistema) explicitamente. Os resultados dessas análises podem ser utilizados em conjunto com outros indicadores, como econômicos e ambientais, e assim proporcionar uma abordagem facilmente ampliada a efeitos indiretos em segmentos da sociedade (HERENDEEN, 2004). O uso racional de recursos energéticos, que há algum tempo era considerado como um fator pouco preocupante em relação ao seu esgotamento é agora uma forte abordagem quando se procura atender às demandas de uma população e de uma economia crescentes.

As análises energéticas não proporcionam um princípio de otimização. Sua função está relacionada com o conhecimento de demanda, eficiência, e com isso o fornecimento de suporte à tomada de decisão (BROWN; HERENDEEN, 1996). Etapas do processo produtivo, representadas pelo uso de fertilizantes, combustível e maquinário têm se tornado gargalos no processo de utilização da energia (CAMPOS; CAMPOS, 2004), e devem ser cuidadosamente avaliados. Assim, subsídios são adquiridos para a tomada de decisão, com o objetivo principal de promover maior eficiência do uso da energia. As medidas de manejo desse enfoque são locais, pois dependem de inúmeras características, nas quais se incluem até mesmo a extensão do país em questão. Fatores como diferentes formas de conduzir uma mesma cultura ou criação de espécie animal, além de fatores como tipo de solo, relevo, que podem representar

consideráveis diferenças no consumo de energia (CAMPOS; CAMPOS, 2004). Cita-se como exemplo o uso de preparo reduzido, ou plantio direto, que frequentemente é associado com o menor uso de energia em relação ao preparo convencional, geralmente requer mais energia na forma de defensivos (RATHKE et al., 2007). Ainda identificam-se outras medidas de manejo, como a adoção de máquinas mais eficientes, rotação de culturas, fertilização orgânica. Portanto a determinação da melhor estratégia de manejo dos sistemas agrícolas depende da análise das condições econômicas e ambientais específicas, bem como dos dados de balanços energéticos e econômicos. As análises energéticas podem, dessa maneira, proporcionar o melhor conhecimento do sistema em termos de uso da energia, e a maximização do ganho energético (ASSENHEIMER; CAMPOS; GONÇALVES JÚNIOR, 2009)

As análises de fluxos de energia ainda são mais comuns de serem feitas em culturas com a finalidade energética, devido à sua própria finalidade. Porém deve-se lembrar que a eficiência do uso da energia no processo de produção é parâmetro importante a ser considerado nos sistemas de produção de culturas em geral, visto que está ligado ao uso e consequente disponibilização de energia. A avaliação energética de sistemas de produção, convencionalmente utilizados para produção de alimentos, desempenha papéis importantes tanto na análise do uso da energia, e consequente subsídio ao uso racional de recursos energéticos (ASSENHEIMER; CAMPOS; GONÇALVES JÚNIOR, 2009; CAMPOS; CAMPOS, 2004), como também na disponibilização de energia (AGOSTINHO; ORTEGA, 2012). Salienta-se que a eficiência energética pode ser definida como uma maior quantidade de serviços realizada com o mesmo input energético, ou uma menor quantidade de *input* energético realizando os mesmos serviços (IEA, 2012). A eficiência energética pode ainda ser aumentada por meio da diminuição do uso de energia oriunda dos insumos, como fertilizantes ou preparo de solo, ou também por meio do aumento do *output* do sistema, como a produtividade da cultura (SWANTON et al., 1996).

Com relação à demanda de energia pelo uso de insumos utilizados, esses podem ser classificados como sendo de uso direto ou indireto. Esse tipo de classificação é variável entre autores. Romanelli e Milan (2010a) realizaram classificação levando em consideração a aplicação e função dos insumos utilizados. Dessa maneira, os insumos de uso direto são aqueles determinados por recomendação agrônômica (fertilizantes, defensivos), e os insumos de uso indireto são representados por bens ativos (maquinários), instalações e os insumos necessários à suas utilizações (combustível, mão de obra).

Castanho Filho e Chabaribery (1983); Carmo e Comitre (1991) e Campos (2001) definiram o consumo direto como aquele oriundo de insumos biológicos (sementes, mudas,

animais e mão de obra humana) insumos fósseis (principalmente petróleo, fertilizantes e defensivos) e energia hidrelétrica. Já o consumo indireto foi considerado como aquele necessário à construção de imóveis, instalações, fabricação de equipamentos e maquinário, sendo computado através da depreciação. Essa classificação, por sua vez, está relacionada com apenas com a presença do uso e não a sua função: se utilizou o insumo, seja ele combustível, defensivo, fertilizante, máquina, houve “consumo”, portanto são de uso direto.

Caso exista interesse na determinação do impacto ambiental ao longo de toda uma cadeia de produção e uso, comum em processos e produtos industriais, (Black et al., 2011) as análises de fluxo de materiais e energia podem ainda ser utilizadas em avaliações de abordagem mais ampla, como a Análise de Ciclo de Vida (ACV). A ACV, por sua vez, é uma ferramenta usada para contabilizar os impactos ambientais associados com um produto ou serviço. O termo “ciclo de vida” refere-se a todas as fases da vida de um produto, desde a extração de recursos ao seu descarte final (BURATTI; FANTOZZI, 2010). O campo de aplicação desse tipo de análise pode ser tão amplo quanto se deseja ou necessita, desde que definido, mas o objetivo é bem claro: a redução do uso de insumos, ou mesmo a procura por outras fontes de energia renováveis no processo agrícola. Esse objetivo, que pode ser combinada com uma produção mais econômica e mais ambientalmente correta, como partes do sistema de manejo (ORTIZ-CAÑAVATE; HERNANZ, 1999), se inicia com a avaliação do fluxo de materiais do sistema, que por sua vez servirá de base para o fluxo de energia do mesmo.

2.5.1 Fluxos de Materiais

O Fluxo de Materiais (FM) é um método que propõe a quantificação da intensidade dos materiais ou insumos utilizados, e que sofrem transformações, e então resultam em *outputs* deste sistema. Seu uso como ferramenta de análise de relações entre a sociedade e a natureza, pode ser considerado como uma inter-relação entre economia e ambiente, na qual a economia é um subsistema embutido no ambiente, e dependentes de uma transferência constante de materiais e energia (HINTERBERGER; GILJUM; HAMMER, 2003).

Na aplicação desse método, os fatores apropriados de intensidade material por unidade de massa, são multiplicados por cada insumo usado, contando com a quantidade total de material biótico, abiótico, água e ar que está direta ou indiretamente relacionada com o *output* produzido. O resultado, em termos quantitativos, representa a carga de material utilizada no

sistema para produção de determinado produto final ou output (CHERUBINI; BARGIGLI; ULGIATI, 2008).

De acordo com Romanelli e Milan (2010a), o estabelecimento dos fluxos de materiais depende dos insumos aplicados e diretamente. Como o fluxo de materiais nada mais é do que a quantificação dos materiais usados no sistema, estes mesmos autores apontam que para a determinação dos insumos aplicados diretamente, o fluxo é relativo às taxas de aplicação (volume, massa ou quantidade por área). Já a determinação do fluxo de materiais dos insumos aplicados indiretamente é mais complexa, e nela são considerados basicamente os componentes de depreciação do maquinário, trabalho humano e consumo de combustível. A determinação dos Fluxos de Materiais é utilizada como base para outras metodologias, como a quantificação dos fluxos de energia do sistema. É utilizado também como base para análises econômicas, visto que determina a quantificação dos insumos usados.

Em relação ao consumo de combustível, o índice desenvolvido por Molin e Milan (2002) permite a estimativa do consumo com base na potência da máquina.

O maquinário, por meio do cálculo de sua depreciação, representa a convergência do ambiente, materiais necessários à produção de outros (petróleo para fabricação de borracha), ou seja, os materiais que serão aplicados indiretamente no maquinário.

O consumo de energia relacionado ao trabalho humano nas operações mecanizadas pode não ser considerado no cômputo da demanda de energia (BOUSTEAD; HANCOCK, 1979; FRANZESE et al., 2009; MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008; ROMANELLI; NARDI; SAAD, 2012; SILVA et al., 2010) devido à mínima contribuição desse tipo de consumo de energia na demanda total do sistema.

A maior razão para não considerar a contribuição do trabalho humano no cálculo de consumo de energia é a sua magnitude. Ao se relacionar a energia extraída de alimentos por dia por um ser humano ($0,144 \text{ MJ kg}^{-1}$ de peso corporal), em um ser humano de 70 kg, esse consumo resulta em 10 MJ. Porém uma grande parte dessa quantia é necessária na própria manutenção do organismo, e com isso a contribuição realmente utilizadas em atividades industriais seria da ordem de 5 MJ dia^{-1} . Nas operações em sistemas altamente industrializados e mecanizados, a contribuição do trabalho humano encontra-se abaixo de 0,5% do consumo total, e pode ser seguramente desconsiderada, o que não seria o caso em sistemas de produção agrícola com uso de trabalho humano e animal no lugar da mecanização (BOUSTEAD; HANCOCK, 1979). Valores que comprovam a pequena participação do trabalho humano no consumo total de energia do sistema foram reportados. Campos et al. (2005), ao analisar a produção de feno de *Cynodon dactylon* (L.) PERS, encontraram 0,18%

de contribuição do trabalho humano no consumo anual de energia. Campos et al. (2009) encontraram o valor de 0,41% da participação do trabalho humano no consumo total de energia na produção de soja em sistema de plantio direto. Assenheimer; Campos e Gonçalves Júnior, (2009) em avaliação de produção de soja em sistema convencional e orgânico, encontraram a participação do trabalho como sendo 0,1% e 0,2% do consumo total de energia, respectivamente. Angonese et al. (2006) encontraram o valor de 0,11% da participação do trabalho humano em sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor.

Com relação aos insumos aplicados diretamente no campo (fertilizantes, calcário, defensivos, sementes), estes compõem o Fluxo de Materiais, por meio de suas respectivas quantidades utilizadas por unidade de área.

2.5.2 Determinação da energia de entrada (EE)

Em um sistema de produção agrícola, todos os insumos utilizados e produtos finais podem ser expressos em termos energéticos. Além disso, a demanda de energia e a energia disponibilizada são fatores essenciais na determinação da eficiência energética da produção (RATHKE et al., 2007).

A demanda de energia de um sistema deve ser avaliada de maneira que não considere apenas a energia disponibilizada, como é o caso da eletricidade, combustíveis líquidos, gasosos e sólidos. Deve também ser avaliada em nível que considere a energia embutida, ou aquela utilizada em processos de produção dos insumos. (PARK; HEO, 2007). Porém muito ainda há de ser melhorado na questão da disponibilidade de dados energéticos em processos de produção, visto que muitos dos dados disponíveis referem-se a países em condições específicas (como processos industriais para manufatura de fertilizantes e outros insumos), dados obsoletos, entre outros (KOOPMANS, 2005).

2.5.3 Determinação da energia de saída (ES)

A energia de saída, ou potencialmente disponível, pode ser calculada após determinado o produto final, suas características e processo de conversão. Por exemplo, para calcular a energia potencialmente disponível por meio do processo de cogeração da cana-de-açúcar, deve-se estimar a quantidade de bagaço disponível e características, como umidade, que por sua vez influencia no processo de conversão, a combustão (CORTEZ; LORA; GÓMEZ,

2008). Para determinar a energia oriunda da produção de etanol (cana-de-açúcar, milho, beterraba, batata, entre outros), deve-se estimar a quantidade de material fermentescível e suas características (tipo de carboidrato disponível, umidade, teor de fibra), que por sua vez influenciarão no processo de conversão, a fermentação, e no rendimento final do combustível (LEAL et al., 2008). No caso de materiais que serão destinados à conversão térmica (combustão) é necessária a determinação da composição estrutural, relativa aos teores de celulose, hemicelulose e lignina, e que por sua vez terão influência direta no rendimento final do processo. A biomassa vegetal é composta principalmente desses três componentes, sendo que uma pequena porção é composta por lipídeos, proteínas, açúcares simples e amidos, além de constituintes inorgânicos e água (SAIDUR et al., 2011).

2.5.4 Indicadores de eficiência energética

A necessidade do uso mais eficiente de recursos energéticos e naturais na produção agrícola e nos diversos sistemas de produção (PIMENTEL, 1984; BORJESSON, 1996; LAL, 2005) culmina na adoção de medidas que promovam o uso mais eficiente da energia nesses sistemas (HINRICHS; KLEINBACH, 2003). Nesse contexto, destaca-se, além das análises dos fluxos de energia, o uso de indicadores da eficiência energética, que juntos representam ferramenta promissora na análise do uso e esgotamento de recursos, como fontes fósseis, além da possibilidade de uma visão holística ao se analisar políticas mundiais, manejo de recursos naturais e proteção ao ambiente (GIAMPIETRO; CERRETELLI; PIMENTEL, 1992).

Para uma análise ser considerada completa, é importante o uso de mais de um indicador, permitindo assim uma visão mais ampla, apontando implicações de decisões em longo prazo. Ao se utilizar apenas um indicador, pode-se estar cometendo algum equívoco quanto à evolução do gasto energético do sistema. Mudanças nos valores dos indicadores ao longo do tempo podem marcar o progresso rumo ao desenvolvimento mais sustentável. Os indicadores não são apenas dados básicos de estatística do uso da energia, em vez disso, eles vão além para promover um entendimento mais profundo das relações causais nos contextos ambiental, energético e econômico, e também como uma maneira de destacar as ligações que podem ocorrer e não estar evidentes por meio da estatística básica. Ao serem tomados em conjunto, os indicadores podem fornecer imagem do sistema energético como um todo, incluindo ligações e *trade-offs* entre as várias dimensões do desenvolvimento mais sustentável, bem como a implicação de comportamento e decisões em longo prazo (VERA; LANGLOIS, 2007).

Deve-se confiar em uma série de indicadores de maneira a estimar mudanças na eficiência. No geral, a eficiência energética, que se refere ao uso de menor quantidade de energia para produzir a mesma quantidade de serviços ou produto final (PATTERSON, 1996), pode ser definida como a relação entre a quantidade de energia produzida por um sistema e a quantidade de energia utilizada para produzir esta mesma (relação *output/input*) (AGOSTINHO; ORTEGA, 2012). A eficiência energética dos agroecossistemas pode ainda ser definida como um dos parâmetros mais consistentes para a sustentabilidade ambiental. Outros fatores, porém, também possuem importância para a avaliação adequada, como o uso de recursos não renováveis e outros danos ambientais que podem advir do processo agrícola (FERRARO JUNIOR, 1999). Portanto, a importância da avaliação da eficiência do uso da energia está na possibilidade de mensuração da capacidade do sistema em transformar um tipo de energia em outro.

Os indicadores de desempenho são frequentemente utilizados na estruturação e troca de informações sobre assuntos-chave, e suas tendências, que por sua vez são considerados importantes no desenvolvimento sustentável (RAMETSTEINER et al., 2011). Os indicadores, portanto, constituem importantes alternativas na descrição e análise da sustentabilidade dos sistemas, sendo, porém, importante considerar seus verdadeiros objetivos e significados. É importante considerar que os indicadores relacionados com a sustentabilidade podem ser utilizados como subsídio em decisões de ordem política, estratégica, científica, em todo o mundo (AGOSTINHO; PEREIRA, 2013), além de prever de maneira mais clara a consequência de ações ou de sua ausência (RAMETSTEINER et al., 2011).

Schroll (1994) ao estudar os fluxos de energia na agricultura dinamarquesa, afirmou que os índices que relacionam *output* com o *input* dos sistemas de produção agrícola são difíceis de serem comparados, pois geralmente são calculados para um curto período (um ano), ou até mesmo incluem apenas uma parte do processo de produção agrícola ou condições (como clima, solo, manejo, uso da tecnologia, decisões políticas) que, por sua vez, influem amplamente nos resultados obtidos. Schroll (1994) realizou esse estudo durante 11 anos, o que permitiu a realização de uma análise mais completa sobre o uso da energia e sua eficiência. Quando combinada com outros tipos de análises (como a econômica) as análises do uso da energia podem fornecer um panorama confiável do comportamento do uso de recursos energéticos no sistema de produção.

Para a avaliação da eficiência do uso da energia na produção de biomassa dos sistemas, utilizaram-se os indicadores denominados EROI (*Energy Return Over Investment*), Balanço Energético (BE) e Energia Incorporada (EI).

2.5.4.1 Balanço energético (BE)

O balanço energético é um indicador da energia disponibilizada por processo ou sistema de produção, sendo que este pode ser calculado subtraindo-se a energia consumida nos insumos usados da energia disponível no produto final (energia de saída – energia de entrada). Essa medida ainda dependerá dos limites da análise, seja relativo à área (MJ ha^{-1}), ao tempo (MJ ano^{-1}), ou até mesmo ambos ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (ROMANELLI; MILAN, 2010b).

O balanço energético visa estabelecer os fluxos de energia, identificando a demanda total e eficiência, refletida pelo ganho líquido e pela relação saída/entrada de energia. Nesse processo, todos os insumos utilizados e produzidos, que por sua vez são transformados em unidades de energia, são quantificados. A estimativa dos balanços de energia e de eficiência energética é um importante instrumento no monitoramento da agricultura em relação ao uso de fontes não renováveis de energia. A utilização do balanço energético pode ser considerada importante ferramenta no auxílio da determinação de novas técnicas e manejo agropecuário, podendo proporcionar economia de energia e aumento de sua eficiência, bem como redução de custos de produção, especialmente em sistemas mais tecnificados (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

Ao estudar a produtividade de biomassa e balanço energético da espécie *Arundo donax* (cana-do-reino), gramínea perene, Angelini; Ceccarini e Bonari (2005), compararam em termos energéticos (balanço energético e EROI) diferentes formas de manejo durante seis anos, sendo eles fertilização, época de colheita e densidade de plantas. Este autor concluiu que a espécie em questão é adequada para uso como cultura energética, devido a sua alta produtividade naquela região específica, com uso mínimo de energia dos insumos do sistema. Neste mesmo estudo, chama atenção o fato de que o autor encontrou os maiores valores (e, portanto, melhores em termos energéticos) de balanço energético em dois tratamentos, diferentes daqueles que representaram os melhores valores de EROI. Os autores identificaram que os maiores valores do balanço energético ocorreram nos tratamentos com fertilização e menor densidade, já os maiores valores de EROI referem-se aos tratamentos sem fertilização, e também com a menor densidade de plantas. Esse fato ocorre porque o menor uso de insumos (sem fertilização e menor densidade de plantas) promoveu uma maior relação entre energia obtida sobre energia gasta (melhor valor de EROI), já a fertilização e baixa densidade de plantas proporcionou uma maior produtividade por área, representando assim o melhor

balanço energético dos tratamentos. Portanto, observa-se a importância do uso de mais de um indicador de desempenho energético, de maneira a se realizar uma análise mais completa.

Rathke e Diepenbrock (2006) avaliaram o BE de oleaginosa de inverno, *Brassica napus* (canola), variando as doses de nitrogênio e as culturas precedentes na rotação (cevada, trigo e ervilha), durante seis anos. Puderam, com isso, concluir que a eficiência energética, calculada por meio do BE, responde principalmente as diferentes aplicações de N, e que para alto *output* do balanço energético, são necessárias altas doses de N. Em relação à rotação, os resultados mostraram que os possíveis efeitos positivos de um cultivo após uma leguminosa, não foi suficiente para suprir as necessidades demandadas de N.

Rathke et al. (2007) utilizaram o BE para analisar dados referentes a 16 anos de áreas de cultivo de milho e soja, sob diferentes sistemas de preparo de solo e rotação de culturas. Puderam concluir que a rotação de culturas influenciou mais nos parâmetros energéticos do que os sistemas de preparo de solo, e ainda que as rotações de culturas que incluem leguminosas e o preparo reduzido do solo melhoram a eficiência energética dos sistemas de produção.

Smyth, Murphy e O'Brien (2009) utilizaram o BE na análise de sistema de produção de bioetanol de silagem de gramíneas. Dessa maneira, puderam concluir que a produção do combustível mostrou-se favorável do ponto de vista energético, apresentando valores similares à produção de biodiesel de palma em condições tropicais. Encontraram ainda, que a produção foi ao menos 50% mais favorável em termos energéticos do que sistemas de produção de bioenergia tipicamente europeus (etanol de trigo, biodiesel de canola).

2.5.4.2 Energy Return Over Investment (EROI)

O EROI é a proporção de energia produzida que é requerida para que ocorra o processo de produção da própria fonte energética. Esse se refere ao ganho líquido de energia obtido através da energia requerida em um processo, e que também pode ser entendida como “rentabilidade energética” (SILVA et al., 2010). É um indicador utilizado nas análises energéticas primárias. Para seu cálculo utiliza-se a demanda acumulada de energia ao longo do processo de produção, fornecendo um índice que determina a relação entre a energia obtida (energia contida no produto final) e a quantidade de energia não renovável requerida ao longo de todo o processo (CHERUBINI; STROMANN, 2011).

O EROI é calculado como sendo a razão entre a energia de entrada e energia de saída, fornecendo assim o retorno energético bruto do sistema. Pode também ser calculado como

sendo a razão entre o balanço energético e a energia de saída, que difere do primeiro cálculo apenas no fato que este apresenta o retorno energético líquido do sistema, portanto, o quanto de energia é retornado após o investimento, já descontado o que é gasto para a própria manutenção do sistema. Como o numerador e o denominador são utilizados nas mesmas unidades, este é um índice adimensional. Se o EROI for alto, apenas uma pequena fração da energia produzida é necessária para manter o processo, mas caso o EROI seja baixo, então a maior parte da energia produzida precisa ser usada para manter o processo de produção (GAGNON; HALL; BRINKER, 2009). Portanto, em um EROI de 10:1, significa que em determinado processo ou sistema de produção houve “rendimento” de 10 Joules a cada Joule de energia “investida”. Com isso, nota-se que o valor de EROI deve ser maior de 1:1, ou seja, deve-se estar produzindo mais energia do que investindo. O EROI é uma ferramenta complementar na análise energética; somente seu uso não representaria critério suficiente para tomadas de decisão. Porém a comparação entre diferentes valores de EROI é útil; com ela pode-se tornar mais completa a comparação entre a viabilidade de uma ou outra fonte de energia. Existe ainda um fator importante a ser levado em consideração: o denominador do índice, que é consequência dos limites do sistema em questão, especialmente na análise de produção de energia alternativa. O limite escolhido, bem como a sua quantificação, deve ser cuidadosamente detalhado e explicitado, caso contrário pode-se obter valores que não correspondem à realidade (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009).

Através do cálculo do EROI, e da mensuração de sua variação ao longo do tempo, obtêm-se um bom indicativo de como a rentabilidade energética de um sistema ou processo está mudando. Portanto, em qualquer sistema de produção de energia, espera-se encontrar um valor de EROI acima de 1,0, caso contrário, estaria sendo usada maior quantidade de energia do que seria retornado, fato que comprovaria a baixa eficiência do sistema.

Macedo (1998) analisou a produção de etanol da cana-de-açúcar no Brasil, para o ano de 1996, durante as fases agrícolas e industriais, utilizando o EROI. Encontrou um valor de 9,2, mostrando, portanto, ser um processo de produção viável do ponto de vista energético. Já Oliveira (2005), ao realizar a mesma análise, encontrou um EROI de 3,7, concluindo que o uso de etanol no lugar da gasolina não é uma opção considerada sustentável do ponto de vista energético. Atribuiu a isso, o fato de que considerou maior quantidade de insumos necessários às fases agrícolas. Nota-se, portanto, a importância da definição e detalhamento dos limites e insumos do sistema avaliado.

Campos et al. (2005) ao realizarem análise energética na produção de feno de *Cynodon dactylon* utilizando EROI, desde a implantação até fenação e armazenamento, encontraram

um valor de 4,3 para a rentabilidade energética. Concluíram que este é um sistema sustentável do ponto de vista energético.

Murphy; Hall e Powers (2011) realizaram investigação sobre a possibilidade de a produção de etanol de milho ser um provedor de energia líquida, por meio do uso do EROI, nos EUA, em mais de 1000 municípios. Estes encontraram um valor médio (1,07) abaixo daquele considerado necessário (3:1 ou mais) ao suporte de maneira sustentável o processo de produção deste combustível.

2.5.4.3 Energia Incorporada (EI)

Energia incorporada pode ser definida como a quantidade de energia adquirida ou comercial que é requerida direta e indiretamente pelo processo de produção de um bem ou serviço (BROWN; HERENDEEN, 1996; FRANZESE et al., 2009).

A energia incorporada ou intensidade energética do produto final é a relação entre a carga obtida por unidade de massa do produto (MJ t^{-1}), ou ainda, um índice que relaciona a biomassa produzida com a energia demandada pelo sistema de produção. Este indicador representa o resultado da atribuição de demanda de energia no processo de produção do insumo em questão.

A utilização da energia incorporada possui foco no uso da eletricidade, fertilizantes e outros produtos industriais, maquinário e instalações, todos fornecidos a um processo em termos de equivalência de uso de petróleo (também conhecida como “energia comercial”). Esta é uma abordagem relacionada com a questão do esgotamento de fontes fósseis, portanto, todos os insumos que não requerem o uso de fontes fósseis (como os recursos naturais) não são contabilizados. Para o seu cálculo, são seguidos basicamente duas etapas: a quantificação (em termos de massa, volume ou energia) de todos os insumos, e sua posterior associação com seus respectivos valores de energia incorporada, que por sua vez representam toda a energia comercial previamente utilizada em seus processos de produção (AGOSTINHO; PEREIRA, 2013).

Zentner et al. (1989) compararam demanda, produto final e eficiência do uso da energia em diferentes rotações de culturas (trigo e outros cereais forrageiros) e práticas de manejo (uso de fertilizantes) no Canadá ao longo de 18 anos. Foi concluído que ao utilizar culturas como centeio e aveia todos os anos em rotação, no lugar do cultivo tradicional somente do trigo, diminui a demanda de energia dos sistemas, porém ao mesmo tempo também diminui

substancialmente o produto final, neste trabalho calculado como unidade de proteína por unidade de energia.

Rathke et al. (2007) utilizaram a energia incorporada na análise da eficiência em produção de milho e soja, sob diferentes preparos de solo e rotação de cultura. Concluíram que a energia incorporada dos grãos variou entre os diferentes preparos de solo, sendo que foi menor no plantio direto e preparo reduzido, e maior quando se realizou a aração convencional. As rotações também provocaram variação na energia incorporada dos grãos, sendo que foi menor quando se utilizou do sistema de rotação, e maior quando se conduziu a soja continuamente.

2.5.5 Panorama energético mundial de forrageiras usadas para alimentação no Brasil

Neste tópico, pretende-se fornecer visão sobre a situação do uso energético das culturas avaliadas nesse trabalho, que tradicionalmente não são utilizadas nessa finalidade no Brasil. As culturas abordadas são: milho (*Zea mays* L.), sorgo (*Sorghum bicolor*), cultivares de *P. maximum* e cultivar de *Cynodon* spp., milheto (*Pennisetum glaucum*), aveia (*Avena strigosa* Schreb.), azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) e cevada (*Hordeum vulgare*).

A cultura do milho é amplamente utilizada como fonte de bioenergia, na produção de etanol nos EUA (RFA, 2009). Em 2010, 42% da produção de $3,16 \cdot 10^8$ Mg, foi destinada à produção de etanol. Na cultura do milho, o etanol é produzido a partir da fermentação do amido (KLOPFENSTEIN; ERICKSON; BERGER, 2013), porém seu rendimento energético não é considerado favorável como o da cana-de-açúcar, e possui valores de eficiência próximos ao da cultura do sorgo para a produção desse combustível líquido. Murphy, Hall e Powers (2011) reportaram valores de EROI de em média 1,07 para todo o processo de produção de etanol do milho em todo o EUA. Já no Brasil, a cultura é utilizada somente para consumo animal e humano, não havendo, portanto o uso como fonte de bioenergia. Em relação ao enfoque energético, o milho não é utilizado somente como matéria-prima para a produção de etanol; Murphy et al. (2011) apontam que atualmente, a produção de biogás de materiais culturais, como a silagem de milho, representam ainda uma pequena, porém em contínuo crescimento, participação no fornecimento de energia. Este autor comenta que esse uso específico da biomassa do milho vem se tornando uma importante opção de empreendimento agrícola em países europeus, como Áustria, Dinamarca e Alemanha. Isso se deve ao fato de que essa é uma cultura bastante adequada à produção de silagem, devido à sua composição (que favorece a fermentação) e umidade (que dificultaria a secagem para

produção de feno, por exemplo). O uso do milho como silagem representa uma boa opção em regiões úmidas, nas quais existe alto índice de perdas por danos mecânicos na colheita de material destinado à produção de feno (COLLINS; OWENS, 2003). Com relação ao processo da biodigestão, salienta-se que uma grande variedade de culturas anuais e perenes pode ser utilizada para tal finalidade. Biomassa úmida ou silagem podem ser utilizadas na maior parte dos biodigestores existentes. A biodigestão, ainda, por meio do uso do material residual oriundo do processo, e sua aplicação no solo, pode minimizar o esgotamento de nutrientes do solo, problema frequentemente associado com a condução intensa de monoculturas (MURPHY et al., 2011).

O sorgo é uma cultura vem sendo recentemente considerada uma opção interessante para uso como fonte de energia. É uma cultura considerada não exigente em fertilidade e umidade. Sua rusticidade também é relativa à cana-de-açúcar (DAVILA-GOMEZ et al., 2011), cultura com a qual vem sendo comparada. O sorgo sacarino, que possui estrutura dos colmos semelhantes à cana-de-açúcar, pode ser obtido no período da entressafra desta, e além de utilizar o mesmo maquinário, apresentar alta conversão de energia (considerando o processo industrial para obtenção do etanol), variando de 700 L ha⁻¹ a 1.050 L ha⁻¹ (DAVILA-GOMEZ et al., 2011). A cultura ainda apresenta vantagens, como o ciclo rápido (quatro meses), é totalmente mecanizável, possui colmos com açúcares diretamente fermentáveis, possibilidade da utilização do bagaço para a co-geração de energia ou ainda forragem para alimentação animal, favorecendo o balanço energético. Com isso o sorgo poderia ser conduzido como uma matéria-prima auxiliar em áreas de produção de cana, no período de sua entressafra, utilizando a mesma infra-estrutura (área e máquinas) para produção adicional de etanol (MAY et al., 2012). Atualmente, agências de pesquisa, governo e indústria vêm trabalhando no melhoramento de variedades de sorgo sacarino. Para a safra de 2012/13, estimou-se o cultivo de até 100.000 ha, área cinco vezes maior que a da safra anterior, e mais de 30 indústrias envolvidas com a produção do etanol do sorgo (GOMES, 2012).

Em termos de produtividade anual e componentes estruturais visando a conversão térmica, cultivares de *Panicum maximum* e de *Cynodon* spp, como o Tifton 85, apresentam bons resultados. A primeira é conhecida mundialmente por suas altas produtividades, além de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas. Sua produção, contudo, é notadamente estacional, com mais de 80% concentrada na estação chuvosa. Além disso, apesar de sua adaptabilidade a diferentes ambientes, deve-se considerar que para a obtenção de elevados níveis de produção, é necessário considerar sua exigência nutricional, em termos de correção

de solo e adubação (JANK et al., 2010). A segunda também apresenta exigência nutricional para apresentar elevados níveis de produtividade, sendo a cultivar 85, a de mais alta produção entre os *Cynodons*. No Brasil, essas culturas perenes são utilizadas para pastejo e produção de feno e silagem, não apresentando ainda uso com finalidade energética. Nos EUA e Europa, gramíneas perenes de alta produtividade, como o *switchgrass*, miscanto, cana-do-reino, vêm sendo amplamente pesquisadas para a produção de energia (ANGELINI et al., 2009; ANGELINI; CECCARINI; BONARI, 2005; McLAUGHLIN; KSZOS, 2005; SMEETS; LEWANDOWSKI; FAAIJ, 2009; VARVEL et al., 2008). Essas gramíneas podem ser utilizadas, assim como já relacionado para a cultura do milho, para o funcionamento de biodigestores, por meio de sua silagem. Porém deve-se atentar ao manejo adequado de acordo com o tipo de transformação a ser empregada; a realização de poucos ou único corte no ano dessas culturas, favorecem o alto conteúdo fibroso, apresentam altos teores de lignina, o que seria favorável à conversão térmica (altos teores de lignina facilitam a combustão), porém não desejável na biodigestão (dificultam a biodegradação e prejudicam a produção de metano) (MURPHY et al., 2011).

O milheto, no Brasil, é utilizado por meio do uso de seus grãos ou a planta inteira, para consumo animal, e em alguns países até mesmo para a alimentação humana. A cultura possui características desejáveis para uma fonte de biomassa, em especial a produção de fitomassa mesmo em condições de baixa fertilidade e umidade do solo. No Brasil, seu uso é em sua maior parte destinado ao animal (como forrageira para pastejo, grãos para alimentação animal, além de cobertura do solo no sistema de plantio direto) não havendo ainda, portanto, sua destinação à bioenergia. Outra espécie do gênero (*Pennisetum purpureum*, o capim-elefante) já possui um maior direcionamento na pesquisa para a transformação energética (FLORES, 2009; STREZOV; EVANS; HAYMAN, 2008). Sua estrutura e composição ainda o configuram como uma opção para silagem (NETTO; BONAMIGO, 2005), o que poderia levá-lo ao uso na biodigestão e para conversão térmica (devido à composição estrutural).

As culturas da cevada, aveia, e aveia, ao considerar-se a finalidade energética, não apresentam grande relevância mundial. Referências nesse contexto são escassas, sendo mais comum o estudo do uso de seus resíduos (ERGUDENLER; GHALY, 1994; MONFORTI et al., 2013). Porém salienta-se a importância dessas culturas na alimentação, animal ou humana (CARVALHO et al., 2010), pois ao se atribuir apenas o valor energético a todas as culturas, poder-se-ia estar não representando o verdadeiro valor (nutricional) à diversas culturas. Portanto, não se afirma que seus cultivos e usos não devam ser realizados, e ressalta-se novamente a importância do uso das informações no planejamento do sistema de

produção mais eficientes e sustentáveis do ponto de vista não apenas econômico, mas também ambiental.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Nessa seção são apresentados em sequência, a descrição do local de estudo, as culturas que foram avaliadas, o detalhamento dos sistemas de produção e as ferramentas utilizadas na análise dos dados.

3.1 Localização das áreas de estudo

Os sistemas de produção agrícola estudados foram conduzidos na região dos Campos Gerais, estado do Paraná. O estado do Paraná apresenta destaque na produção agrícola nacional; possui altos índices de produtividade em culturas, como milho, cevada, aveia, trigo, feijão e produção leiteira em relação à média nacional. Segundo a CONAB (2012), o estado é responsável pela segunda maior produção de culturas de cereais no país, atrás apenas do estado do Mato Grosso. O estado ainda é responsável pelas maiores produtividades de milho e cevada, e a segunda maior de aveia no Brasil (SEAB, 2012a).

Os Campos Gerais (Figura 7) localizam-se na porção Centro-Sul do estado e abrangem 26 municípios em uma área de 28 mil km², apresentando predominância dos tipos climáticos Cfa e Cfb (Classificação de Koppen) (MAACK, 2002). Os solos mais frequentemente encontrados são os latossolos e cambissolos (EMBRAPA, 2002). O relevo oscila entre suave até ondulado com altitudes de 600 a 1.200 m em relação ao nível do mar.

Figura 7 - Localização da região dos Campos Gerais, no estado do Paraná, Brasil

A região dos Campos Gerais foi escolhida por representar o destaque que o estado do Paraná possui no país na produção agrícola.

A região é especializada na produção de grãos, assumindo elevada importância no agronegócio paranaense, além de ser pioneira no sistema de plantio direto, que preconiza a mínima mobilização do solo, e que apresenta melhor eficiência em análises energético-ambientais em relação ao sistema de plantio convencional (ORTEGA et al., 2001). Nessa região, grande parte dos produtores encontra-se associados em sistema de cooperativas, que além de facilitar o processo de comercialização da produção, possibilita aos produtores o acesso à informação tecnológica e econômica (NETO; ROCHA, 2007).

Dados relativos à participação de todos os 399 municípios do estado no valor bruto da produção agropecuária, que representa o volume financeiro arrecadado pela produção agropecuária, apontam os 26 municípios da região dos Campos Gerais com participação de 13,5% no valor total (SEAB, 2012b). Dessa maneira, nota-se a importância da região na produção e comercialização agropecuária total do estado.

3.2 Sistemas de produção avaliados

A produção agrícola da região possui como base o cultivo de espécies comerciais na safra principal (verão), em especial de milho e soja, e de espécies comerciais ou para a cobertura do solo na safra de inverno, como a aveia e o trigo (GIMENEZ, 2006). Para a avaliação dos sistemas de produção, nota-se a importância do conhecimento de suas características, como os índices de produtividade regionais (Tabela 1).

Tabela 1 - Culturas avaliadas e suas características

Nome popular	Nome científico	Ciclo	Produção MS** (t ha ⁻¹)
Milho	<i>Zea mays</i> L.	Anual	16,5
Aveia-preta	<i>Avena strigosa</i> Schreb.	Anual	4,2
Azevém	<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	Anual	4,5
Tifton 85	<i>Cynodon spp.</i> cv. Tifton 85	Perene	10,0
<i>P. maximum</i> *	<i>Panicum maximum</i>	Perene	10,0
Milheto	<i>Pennisetum glaucum</i>	Anual	6,3
Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i>	Anual	9,0
Cevada	<i>Hordeum vulgare</i>	Anual	6,0

*Cultivares Áries, Atlas, Mombaça e Tanzânia; **MS = Matéria seca. Fonte: Fundação ABC.

Na região, as culturas perenes não são colhidas, pois são normalmente utilizadas para o pastejo. Nesse trabalho, contudo, realizou-se simulação de uma colheita no ano. Devido à simulação do uso da cultura para a finalidade energética, objetiva-se o maior acúmulo de biomassa para a colheita, não havendo a necessidade de inúmeras colheitas no ano para fornecimento de alimento (como feno ou silagem) ao animal. A realização de mais de uma operação de colheita resultaria em maior demanda de energia, o que comprometeria o enfoque energético da análise dos sistemas de produção.

Os dados referentes às doses de insumos aplicados e às operações mecanizadas foram obtidas no banco de dados fornecido pela Fundação ABC. Tais dados foram obtidos por meio de questionário aberto, aplicado aos produtores cadastrados nas cooperativas associadas à Fundação (Capal, Batavo e Castrolanda).

3.3 Operações avaliadas

Para a determinação dos fluxos de energia dos sistemas, o algoritmo apresentado na Figura 8, adaptado de Romanelli; Milan (2010b) foi utilizado. Neste são consideradas as operações mecanizadas, e o método utilizado (fluxos de materiais, fluxos de energia e indicadores) na avaliação dos sistemas de produção.

Figura 8 - Algoritmo utilizado na avaliação dos fluxos de energia dos sistemas de produção. Adaptado de: Romanelli; Milan (2010b).

A avaliação dos sistemas de produção abrange as seguintes operações mecanizadas (1): distribuição de calcário (2), distribuição de esterco (3), semeadura (4), distribuição de fertilizantes (5), pulverização (6) e colheita (7).

Em todas as operações mecanizadas, são utilizados dados relativos ao maquinário (8) que inclui tratores e implementos (potência, massa, largura de operação, vida útil). Capacidade de campo operacional (9) é oriundo do banco de dados. Características do conjunto motomecanizado (potência do trator e número de operações) e Capacidade de campo Operacional (CcO) são utilizadas na determinação do consumo operacional de combustível (12) e com a massa e vida útil do maquinário, determinam a depreciação do conjunto trator-implemento (13). Esses por sua vez, aliados ao insumo (10) e sua quantidade aplicada, obtida

por meio da dosagem de insumos recomendada por prescrição agronômica (14), representam o Fluxo de Materiais (15).

O Fluxos de Materiais, que determina a taxa de consumo dos insumos (diretos e indiretos) utilizados por unidade de área (12, 13 e 14) quando associado à energia incorporada (16) de cada insumo utilizado, representa o consumo do insumo em termos energéticos. A soma dos insumos em equivalente energético determina a energia de entrada (EE), ou demanda de energia do sistema (17).

A determinação da energia de saída (ES) (18) é feita pela associação de características estruturais da cultura com suas produtividades. Com a associação da EE e ES, determina-se os indicadores da eficiência BE (19) e EROI (20). Ao se associar a EE com a produtividade das culturas, determina-se a EI (21).

Com exceção da cultura do sorgo, na qual não é aplicada dose de calcário, e do Tifton 85, na qual não é realizada pulverização, as operações mecanizadas são comuns a todas as culturas (Tabela 2).

Tabela 2 - Características dos equipamentos e insumos usados nas operações avaliadas dos sistemas de produção

Operação	Velocidade (km h ⁻¹)	Trator	Implemento	Largura (m)	Insumo aplicado
Distribuição calcário	3,8	4x2 TDA 67 kW	Distribuidor de calcário	10	Calcário
Distribuição esterco	5,7	4x2 TDA 82 kW	Distribuidor de esterco líquido	1,75	Esterco
Semeadura	¹ 3	4x2 TDA 67 kW	¹ semeadora de precisão 7 e 8 linhas espaçamento 45 cm	¹ 3,6	Sementes
	² 3,6	4x2 TDA 82 kW	² semeadora fluxo contínuo 17 a 22 linhas espaçamento 17 cm	² 3,8	
Distribuição Fertilizante	4	4x2 TDA 67 kW	Distribuidor de fertilizante	20	Fertilizantes
Pulverização	10,9	4x2 TDA 90 kW	Pulverizador de arrasto	24	Herbicidas, Fungicidas, Inseticidas
	6,6	4x2 TDA 67 kW	³ Colhedora de forragem	6	-
Colheita	9,5	⁴ Colhedora de forragem autopropelida 323 kW		2	-

Obs: ¹ Refere-se a cultura do milho e sorgo; ² Refere-se à aveia, azevém, cevada e milheto,..
³Refere-se à aveia, azevém, cevada e Tifton 85. ⁴Refere-se à milho, sorgo, milheto e *P.maximum*

Na maior parte das operações, o maquinário é comum a todas as culturas, com exceção da semeadura e da colheita. Na semeadura da cultura do milho, utilizou-se semeadora de precisão. Para as demais culturas, utilizou-se semeadora de fluxo contínuo.

Na operação de colheita, nas culturas do milho e sorgo é utilizada colhedora de forragem autopropelida, e simulou-se o uso dessa colhedora também para as culturas do milheto e *P. maximum*, visto que são culturas de porte elevado, mais adequadas ao uso dessa máquina (na região essas duas culturas são utilizadas tradicionalmente para o pastejo). Para as culturas do azevém, cevada, aveia, Tifton 85 e cevada, simulou-se o uso de colhedora de forragem de arrasto, adequada para culturas de menor porte e colmos finos, como as forrageiras de clima temperado. Na região, aveia e azevém são utilizadas para produção de silagem pré secada, realizando corte, espalhamento, enleiramento e recolhimento, operações

que não foram abordadas neste trabalho. Cevada é utilizada para produção de silagem, e Tifton 85 utilizada no pastejo.

Para a contabilização dos insumos e energia na operação de distribuição de calcário, (realizada a cada dois ou quatro anos, disponível nos Anexos A a H), procedeu-se anualizando o consumo, portanto, como se a operação fosse realizada todos os anos, apenas em uma fração do total consumido na realização de uma distribuição de calcário.

Para as cultivares de *P. maximum*, foram realizados cálculos referentes à média anual de demanda de insumos e de energia. O ciclo considerado para a cultura abrange primeiro ano, de implantação, e cinco anos de manutenção.

Para a cultura do Tifton 85, considerou-se dados relativos ao período de manutenção da cultura, não envolvendo o primeiro ano, de implantação. Devido à longevidade do material genético da cultura (LONDERO et al., 2013), para o consumo de insumos e de energia dessa fase, considerou-se sua “diluição” ao longo dos anos de manutenção da cultura.

3.4 Fluxo de Materiais

Primeiramente determinou-se a classificação de utilização dos insumos. A classificação utilizada a foi proposta por Romanelli; Milan (2010a), sendo assim, o maquinário e o combustível foram considerados como insumos de uso indireto, e os produtos aplicados diretamente no campo por meio das operações mecanizadas, foram classificados como insumos de uso direto. Após a classificação, determinou-se as quantidades utilizadas dos insumos por área.

3.4.1 Insumos indiretamente aplicados

A quantificação dos insumos utilizados indiretamente foi obtida por meio dos cálculos de consumo de combustível e depreciação do maquinário.

3.4.1.1 Combustível

A determinação do combustível foi feita de maneira a estimar o consumo desse insumo para todas as operações mecanizadas desenvolvidas nos sistemas de produção. Foi adaptado modelo desenvolvido por Molin; Milan (2002) (Equação 1). Esse modelo foi escolhido, pois

apresentou menor variação no consumo em relação ao modelo proposto pela ASAE (2003) como apontado por Romanelli; Milan (2012).

$$CC = \frac{PM \times CS}{CcO} \quad (1)$$

Em que:

CC= Consumo de combustível, L ha⁻¹;

PM= Potência bruta do motor, kW;

CS= Consumo específico (fator para motores a diesel), 0,163 L kW⁻¹ h⁻¹;

CcO = Capacidade de campo operacional ha h⁻¹.

3.4.1.2 Depreciação do Maquinário

A depreciação do maquinário (Equação 2) foi calculada para o conjunto mecanizado, sendo que para tanto foi utilizada a depreciação do trator e do implemento, considerando portanto, suas diferentes massas e vidas úteis. A depreciação foi calculada com base na capacidade operacional, na vida útil e na massa do conjunto mecanizado, e traduzida em unidade de energia.

$$DM = \frac{M}{(VU \times CcO)} \quad (2)$$

Em que:

DM = Depreciação do maquinário, kg ha⁻¹;

M = Massa do maquinário, kg;

VU = Vida útil do maquinário ou implemento, h.

3.4.2 Insumos diretamente aplicados

As quantidades de insumos aplicadas diretamente (fertilizantes, calcário, defensivos e sementes), pré-determinadas por recomendação técnica para as culturas avaliadas, são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Utilização de fertilizantes, calcário e sementes nas culturas

Tabela 5 – Utilização de fertilizantes, calcário e sementes nas culturas						
Cultura	Fertilizantes				Calcário	Sementes
	NPK (10-20-20)	Uréia	KCl	Super Fosfato Simples		
	----- (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹) -----					
Milho	300	240	190	75	500	25
Sorgo	300	107	44	-	-	10
Aveia	200	129	132	-	500	80
Azevém	200	196	251	-	500	50
Cevada	200	196	45	-	500	100
Milheto	100	218	-	-	500	25
<i>P. Maximum</i>	200*	196	-	-	1000	30*
Tifton 85	0	196	-	-	1000	-

* No ano de implantação da cultura, considerando-se 6 anos de ciclo.

Tabela 4 - Utilização de defensivos nas culturas

Tabela 4 - Utilização de defensivos nas culturas				
Cultura	Defensivos			Adjuvantes
	Herbicidas	Fungicidas	Inseticidas	
	L ha ⁻¹ ano ⁻¹			
Milho	7,2	0,4	0,4	1,1
Sorgo	5,0	-	1,6	0,5
Aveia	2,8	0,1	-	-
Azevém	2,8	0,1	-	-
Cevada	2,8	3,1	0,3	0,7
Milheto	2,8	-	-	0,1
<i>P. Maximum</i>	3,0*	-	-	-
Tifton 85	-	-	-	-

* No ano de implantação da cultura, considerando-se 6 anos de ciclo.

Em relação ao esterco aplicado, observa-se a falta de consenso na determinação de sua energia incorporada, por este ser um material de origem biológica. Nesse estudo, contabilizaram-se os insumos adquiridos no mercado, oriundos de fontes fósseis de energia, e não se considerou a contribuição ambiental (sol, chuva, evapotranspiração) nos processos de produção de materiais de origem biológica. Ao se considerar o animal e toda sua cadeia, envolvendo materiais, combustível, instalação, eletricidade, deve-se atentar para o fato de esse ser um coproduto, que diferente da carne utilizada no consumo, permanece no campo, portanto não ultrapassa os limites do sistema. E, finalmente, a atribuição de um valor coerente com esse tipo de participação é complexa, ao se atribuir os conteúdos energéticos dos

principais nutrientes presentes no material (NPK) atribui-se a esses valores relativos a todo um processo industrial, que não corresponde ao seu real processo de obtenção. Portanto, optou-se por não considerar seu conteúdo de energia incorporada, visto que este é um material de origem biológica, sem a contribuição direta de fontes fósseis de energia na operação mecanizada de distribuição de esterco. Sendo assim, à distribuição de esterco, foi considerada apenas a demanda de energia do combustível e da depreciação do maquinário.

3.5 Fluxos de energia nos sistemas

A cada um dos valores determinados por meio do Fluxo de Materiais dos insumos diretos e indiretos, foi atribuído seu respectivo conteúdo de energia incorporada, adotado da literatura (Anexo I). À associação desses valores obteve-se a demanda de energia do sistema (EE).

3.5.1 Determinação da Energia de Entrada (EE)

O somatório da associação do Fluxo de Materiais, com seus respectivos conteúdos de energia incorporada, resultam na demanda total de energia, ou EE do sistema. A EE dos sistemas de produção foi calculada através da Equação 3 (ROMANELLI ; MILAN, 2010b)

$$EE = \sum (FM \times EI \text{ insumos}) \quad (3)$$

Em que:

EE = Energia de entrada ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

FM = Fluxo de material (massa unidade⁻¹);

EI = Energia incorporada dos insumos (MJ unidade^{-1}). Valores de EI dos insumos apresentados no anexo I.

3.5.2 Determinação da Energia de Saída (ES)

A energia de saída foi calculada com base no conteúdo de componentes estruturais que possuem importância no uso energético: a lignina, a celulose e a hemicelulose.

A determinação do potencial energético disponível pelas culturas realizada por meio dessa associação fornece uma ideia do quanto de energia é fornecida, caso a rota de conversão

utilizada fosse a combustão. Essa, porém, não é a única opção de utilização da biomassa para fins energéticos. Podem ser utilizadas além da combustão, a pirólise e a gasificação, que compõe a conversão térmica (atualmente a rota mais utilizada). Pode ser utilizada ainda a rota bioquímica (menos comum) e preferida para a biomassa com maior composição de água, e composta pelas rotas de fermentação, digestão anaeróbica e fermentação.

O cálculo da energia disponibilizada ou energia de saída foi realizado de acordo com o conteúdo de componentes estruturais: a lignina, a celulose e a hemicelulose. Para tanto, foi determinada a composição desses componentes estruturais na matéria seca das culturas (Tabela 5) e então a essas se associou a energia incorporada dos componentes estruturais. A ES foi calculada com base na planta inteira, visto que as culturas avaliadas (com exceção de *P. maximum*, Tifton 85 e milheto) são colhidas para silagem na região. Para as culturas e perenes e o milheto, portanto, realizou-se simulação de colheita da biomassa total. Dessa maneira, pôde-se determinar o conteúdo de energia potencialmente disponível das culturas por meio da equação 4.

$$ES = (PCL \times CtL) + (PCC \times CtC) + (PCH \times CtH) \quad (4)$$

Em que:

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

PCL= Poder calorífico da lignina (MJ kg^{-1});

CtL= Conteúdo de lignina na matéria seca (kg);

PCC = Poder calorífico da celulose (MJ kg^{-1});

CtC = Conteúdo de celulose na matéria seca (kg);

PCH = Poder calorífico da hemicelulose (MJ kg^{-1});

CtH = Conteúdo de hemicelulose na matéria seca (kg).

Tabela 5 – Composição dos componentes estruturais na matéria seca das culturas avaliadas

Cultura	Componentes estruturais (% na MS)			Fonte
	Lignina	Celulose	Hemicelulose	
Milho	3,4	28,9	20,0	Filya, 2004
Sorgo	4,4	25,3	27,6	Pedreira et al, 2003
Aveia	2,4	26,6	21,0	Rebolé et al, 1996
Azevém	1,7	28,3	26,9	Waghorn et al, 1989
Cevada	3,0	24,6	21,8	McCartney e Vaage, 1993
Milheto	7,8	27,7	29,6	Singh et al, 1977
<i>P. maximum</i>	10,6	38,3	26,6	Brown e Adjei, 1995
Tifton 85	6,4	25,0	35,7	Sun e Cheng, 2002

3.6 Indicadores de eficiência energética

Com a utilização dos dados de demanda, disponibilização de energia, e produtividade das culturas, foram calculados os indicadores de eficiência energética: balanço energético, rentabilidade energética e energia incorporada da biomassa.

3.6.1 Balanço Energético (BE)

O balanço energético, ou energia líquida disponível por área foi calculado de acordo com a equação 5 (SIQUEIRA; GAMERO; BOLLER, 1999):

$$BE = ES - EE \quad (5)$$

Em que:

BE= Balanço energético, MJ ha⁻¹ ano⁻¹.

3.6.2 Energy Return Over Investment (EROI)

O indicador da rentabilidade energética foi calculado de acordo com a equação 6 (HALL, 2004):

$$EROI = \frac{ES}{EE} \quad (6)$$

Em que:

EROI= *Energy return over investment*, ou rentabilidade energética, MJ MJ⁻¹

3.6.3 Energia Incorporada (EI)

A quantidade de energia embutida através do processo de produção foi determinada conforme a equação 7 (ROMANELLI; RAUCCI, 2011):

$$EI = \frac{EE}{P} \quad (7)$$

Em que:

EI= Energia Incorporada ou Intensidade energética do produto final (biomassa), MJ t⁻¹.

3.7 Análise de sensibilidade

Uma análise de sensibilidade foi realizada com o objetivo de identificar as variáveis (representadas por insumos nas operações) que mais influenciam na demanda de energia dos sistemas de produção. Para isso, alterou-se em percentual fixo (10%) o consumo de todos os insumos (diretos e indiretos) em todas as operações. Dessa maneira, pôde-se verificar o impacto dessa variação na demanda de energia (EE) dos sistemas. Essa técnica foi utilizada por Romanelli; Milan (2010a). Devido ao número de culturas, operações e insumos aplicados, optou-se em demonstrar as operações e insumos das culturas que apresentaram variação na demanda de energia (EE) maior que 1% de seu total.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fluxo de materiais

Os insumos utilizados foram agrupados e quantificados na representação do Fluxo de Materiais dos sistemas de produção (Tabela 6).

Tabela 6 - Fluxo de materiais dos insumos utilizados nos sistemas de produção avaliados

Cultura	Fluxo de Materiais (unidade ha ⁻¹)					
	Direto				Indireto	
	Calcário	Defensivos	Fertilizantes	Sementes	Maquinário	Diesel
	t	L	kg	kg	kg	L
Milho	0,5	9,1	730,0	25,2	3,3	44,9
<i>Sorgo</i>	-	7,1	451,0	10,0	2,5	38,6
Aveia	0,5	2,9	461,0	80,0	2,9	30,5
Azevém	0,5	2,9	647,0	50,0	2,9	31,9
Cevada	0,5	6,9	441,0	100,0	2,9	34,5
Milheto	0,5	2,9	318,0	25,0	2,8	39,4
<i>P. maximum</i> ^a	1,0	3,0 ^a	396,0	30,0 ^a	2,8	46,4
Tifton 85 ^b	1,0	-	196,0	-	2,2	38,8

^a Refere-se a insumo usado somente no primeiro ano; ^b refere-se à manutenção da cultura.

Com relação aos insumos aplicados diretamente, em quase todas as culturas avaliadas, nota-se o maior consumo em termos de massa relativo ao uso do calcário, com exceção para as culturas do milho e azevém (nessa, o maior consumo em massa foi oriundo do uso de fertilizantes). Salienta-se, contudo, que um maior consumo em quantidade de massa não se refere a um maior consumo de energia.

Com relação aos fertilizantes aplicados, observa-se que a cultura do milho foi a que recebeu maior aplicação em quantidade (kg), apresentando 12% a mais de massa de fertilizantes aplicados que a cultura do azevém, 58% a mais que a cultura da aveia, 61% a mais que na cultura do sorgo, 65% a mais que a cultura da cevada, 84% a mais que as culturas do *P. maximum* e Tifton 85, e 129% a mais que a cultura do milheto.

Em relação aos defensivos, a cultura do milho foi a que apresentou o seu maior consumo em quantidade (L ha⁻¹), apresentando consumo 28% maior que na cultura do sorgo, 31% maior que na cultura da cevada, 213% maior que nas culturas do milheto, aveia e

azevém e 203% maior que na cultura do *P. maximum*, (nessa cultura a pulverização foi feita somente no primeiro ano). Ao realizar a anualização, do consumo de defensivos nas cultivares de *P. maximum*, o consumo de defensivos é de 0,5 L ha⁻¹, sendo portanto o menor valor entre as culturas.

O consumo de sementes apresentou variação, visto que esse é um insumo inerente a cada cultura, com recomendações agrônômicas específicas para o cultivo de cada cultura, além dos materiais possuírem propriedades físicas diferentes. O consumo em massa de sementes em ordem decrescente foi: cevada, aveia, azevém, *P. maximum* (somente no primeiro ano), milho e milheto.

Com relação aos insumos utilizados indiretamente, a depreciação do maquinário apresentou pequena variação no consumo em massa, devido aos valores de vida útil do maquinário, que são similares entre o maquinário utilizado nas operações mecanizadas.

Em relação ao consumo operacional de diesel, observa-se que para *P. maximum*, houve o maior consumo (46,43 L ha⁻¹), seguido pelas culturas do milho, milheto, Tifton 85, sorgo, cevada, azevém e aveia. O consumo de diesel para *P. maximum* foi 3%, 17%, 19%, 20%, 34%, 45% e 52%, maior que dessas culturas, respectivamente. Dada a importância do combustível (bem como dos fertilizantes), o consumo do diesel foi detalhado, visto que um dos fatores que influenciou a variação no consumo operacional foi o tipo e o número (Anexos C a J) de operações realizadas em cada cultura (Tabela 7).

Tabela 7 – Fluxo de materiais do combustível nas operações mecanizadas dos sistemas de produção avaliados

Cultura	Consumo de Combustível das operações mecanizadas (L ha ⁻¹ ano ⁻¹)						Total
	Pulverização	Distribuição de fertilizante	Semeadura	Distribuição de esterco	Distribuição de calcário	Colheita	
Milho	5,3	2,7	9,8	13,2	0,7	13,2	44,9
Sorgo	4,0	1,3	6,9	13,2	-	13,2	38,6
Aveia	2,6	1,3	6,9	13,2	0,7	5,7	30,5
Azevém	2,6	2,7	6,9	13,2	0,7	5,7	31,9
Cevada	6,6	1,3	6,9	13,2	0,7	5,7	34,5
Milheto	2,6	2,7	6,9	13,2	0,7	13,2	39,4
<i>P. Maximum</i>	0,2	4,0	1,2	26,4	1,4	13,2	46,4
Tifton 85	-	5,3	0,0	26,4	1,4	5,7	38,8

Os resultados de consumo operacional de diesel para as culturas dependem do número de operações, do consumo horário e da capacidade operacional. Para as operações nas quais

se usaram os mesmos conjuntos motomecanizados (exceto semeadura e colheita), o consumo operacional de combustível é constante, visto que a equação empregada utiliza como variável apenas a potência bruta do motor da máquina. Com isso, observa-se a similaridade e proporcionalidade dos consumos operacionais nas culturas, em todas as operações, exceto semeadura e colheita. Dessa maneira, para a maior parte das operações, a variação no consumo operacional é devida apenas ao número de operações realizadas em cada cultura. Por exemplo, na cultura do milheto, aveia e azevém, foram realizadas duas pulverizações, e por meio do uso do modelo, calculou-se um consumo de diesel de $2,6 \text{ L ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Nas culturas do sorgo, milho e cevada, foram realizadas, respectivamente, três, quatro e cinco pulverizações, que, portanto, apresentaram consumos operacionais proporcionais a esse número de operações. Em *P. maximum*, realizou-se a pulverização apenas no primeiro ano, portanto o consumo foi anualizado para que pudesse ser utilizada a média anual de consumo. O mesmo também ocorre com as operações de distribuição de esterco, de fertilizante, e de calcário.

Na semeadura, o consumo operacional para a cultura do milho, diferente das demais culturas, se deve ao uso de outra semeadora e trator (com menor demanda de potência), e à menor CcO, resultando em maior consumo operacional de diesel em relação à semeadora de fluxo contínuo usada nas demais culturas. Para *P. maximum*, da mesma maneira que realizado com a pulverização, o consumo operacional de diesel relativo à semeadura foi anualizado.

No caso da colheita, ao analisar-se o consumo horário de ambas as máquinas (colhedora autopropelida e de arrasto) observa-se que o consumo horário da máquina autopropelida é superior ao da outra máquina ($52,8$ e $10,8 \text{ L h}^{-1}$, respectivamente), sendo que isso se deve à maior potência requerida da colhedora autopropelida ($323,6 \text{ kW}$ em relação aos 67 kW da menor máquina). Ao se analisar a CcO, observa-se que o valor para a máquina autopropelida é superior ao da colhedora de arrasto ($4,0 \text{ ha h}^{-1}$ e $1,9 \text{ ha h}^{-1}$, respectivamente), devido às variáveis operacionais (velocidade, largura, apresentados na Tabela 2) e eficiência operacional. Nessa situação, o consumo operacional da máquina autopropelida foi maior em relação ao da colhedora de arrasto. Contudo, salienta-se que alterações nas variáveis operacionais das máquinas podem alterar os resultados.

Em relação aos valores adotados de CcO da colheita, também optou-se por valores de consumo operacionais constantes. Procedeu-se dessa maneira, pois uma estimativa da CcO pela capacidade de processamento da colhedora e da produtividade da cultura, resultaria numa velocidade excessiva de operação, não correspondendo à realidade. Dessa forma, optou-se em

adotar os valores fixos de CcO (4,0 ha h⁻¹ e 1,9 ha h⁻¹ para a colhedora autopropelida e para a colhedora de arrasto, respectivamente).

Observa-se que entre as operações analisadas, a distribuição de esterco e colheita com a colhedora autopropelida, foram as que apresentaram maiores consumos operacionais de diesel para as culturas do milho, sorgo, milheto e *P. maximum*, com 58%, 68%, 67%, e 85%, respectivamente. Para as culturas que não utilizaram a colhedora autopropelida, aveia, azevém, cevada e Tifton 85, as operações que apresentaram maior consumo operacional de diesel foram a distribuição de esterco e plantio (para Tifton 85, apenas a distribuição de esterco), sendo responsáveis por 65%, 63%, 58%, e 68%, respectivamente.

As informações referentes à demanda de combustível nas operações mecanizadas oferecem suporte à análise de energia incorporada das mesmas, permitindo sua utilização como ferramenta na busca por economia desse insumo.

Determinou-se o fluxo de materiais individualizado por unidade de massa produzida de biomassa, podendo, portanto, observar a quantidade utilizada de cada insumo na produção de uma unidade de massa da biomassa produzida (Tabela 8).

Tabela 8 – Fluxo de materiais dos insumos incorporados na biomassa produzida

Cultura	Fluxo de materiais na biomassa (unidade / t MS)								
	Fertilizantes				Calcário	Sementes	Defensivos	Diesel	Maquinário
	I	II	III	IV					
	-----kg-----						-----L-----		kg
Milho	14,5	18,2	4,5	11,5	30,3	1,5	0,2	2,7	0,2
<i>P. Maximum</i>	20,0	19,6	-	-	100,0	3,0	0,1	4,6	0,4
Tifton 85	-	19,6	-	-	100,0	-	-	3,9	0,2
Sorgo	11,9	33,3	-	4,9	-	1,1	0,3	4,3	0,3
Milheto	34,6	15,9	-	-	79,4	4,0	0,2	6,2	0,4
Azevém	43,6	44,4	-	55,8	111,1	11,1	0,3	7,1	0,7
Cevada	32,7	33,3	-	7,5	83,3	16,7	0,4	5,7	0,5
Aveia	30,7	47,6	-	31,4	119,0	19,0	0,3	7,3	0,7

¹ Fert. I = formulado 10-20-20; Fert. II = uréia; Fert. III = superfosfato simples; Fert. IV = cloreto de potássio; ² refere-se aos insumos usados apenas na implantação da cultura; ³ unidade em kg; ⁴ unidade em L.

Observa-se que o calcário apresenta a maior participação em termos de sua massa utilizada na produção de unidade de biomassa (tonelada).

Em relação aos fertilizantes na produção de biomassa, observa-se que o uso do fertilizante nitrogenado é o mais expressivo, além de também ser o único aplicado em todas as culturas.

Observa-se que para todos os insumos avaliados (calcário, fertilizantes, diesel, defensivos, maquinário), a variação de sua incorporação na biomassa, se deve não somente à variação do consumo do insumo entre as culturas, mas também devido à variação das produtividades.

O fluxo de materiais de defensivos e maquinário na produção de biomassa indica que os referidos materiais têm quantidades menos expressivas em termos de quantidades específicas de cada um desses insumos utilizados.

Devido à importância dos fertilizantes no fluxo de materiais e de energia dos sistemas, detalhou-se o consumo dos fertilizantes por cada tipo utilizado (Tabela 9) por meio de seu elemento ou composto ativo em massa, e sua respectiva participação (subtotal) em relação à quantidade (massa) total de fertilizantes utilizados (também contabilizados em termos de quantidade de elemento ou composto ativo).

Tabela 9 - Fertilizantes utilizados nos sistemas de produção avaliados

Consumo de fertilizantes*						
Cultura	N	Subtotal	P ₂ O ₅	Subtotal	K ₂ O	Subtotal
	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	%	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	%	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	%
Milho	138,0	22%	193,5	31%	294,0	47%
Sorgo	108,2	33%	60,0	18%	164,0	49%
Aveia	78,1	28%	40,0	14%	159,2	57%
Azevém	108,2	29%	40,0	11%	230,6	61%
Cevada	108,2	42%	40,0	16%	107,0	42%
Milheto	108,1	73%	20,0	14%	20,0	14%
<i>P. Maximum</i>	88,2	52%	40,0	24%	40,0	24%
Tifton 85	88,2	100%	0,0	0%	0,0	0%

*Refere-se ao elemento/composto ativo do fertilizante.

Observa-se a importância do nitrogênio e potássio em todas as culturas, por meio do consumo em massa dos fertilizantes nitrogenados (uréia e formulado) e potássico (cloreto de potássio e formulado) em todas as culturas. Os fertilizantes nitrogenados e potássicos são aplicados nas operações de plantio e de distribuição de fertilizante. O fertilizante fosforado possui menor uso nas culturas, sendo que foi aplicado somente na semeadura nos sistemas analisados.

4.2 Fluxos de energia

4.2.1 Energia de Entrada (EE)

Ao relacionar o Fluxo de Materiais com a respectiva energia incorporada de cada insumo, determinou-se a demanda, ou energia de entrada (EE) dos mesmos. Foram determinadas a quantificação e participação no total da demanda de energia de acordo com a classificação dos insumos (direto ou indireto) (Tabela 10).

Tabela 10 - Demanda de energia de entrada dos sistemas avaliados.

Cultura	Energia de Entrada				
	Direto	Direto/total	Indireto	Indireto/total	Total
	GJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	%	GJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	%	GJ ha ⁻¹ ano ⁻¹
Milho	12,8	85,9	2,1	14,1	14,8
Sorgo	8,3	82,0	1,8	18,0	10,1
Aveia	7,7	84,1	1,5	15,9	9,2
Azevém	9,6	86,6	1,5	13,4	11,1
Cevada	9,4	85,3	1,6	14,7	11,0
Milheto	7,9	81,1	1,8	18,9	9,7
<i>P. Maximum</i>	7,0	76,8	2,1	23,2	9,2
Tifton 85	6,6	78,5	1,8	21,5	8,5

A maior demanda total de energia dos sistemas é a da cultura do milho, que apresentou valores 33%, 34%, 46%, 52%, 60%, 60%, e 74% superiores aos das culturas do azevém, cevada, sorgo, milheto, aveia, *P. maximum*, e Tifton 85, respectivamente.

Observa-se que a demanda de energia dos insumos usados diretamente apresentou maior importância em relação aos de uso indireto (como no Fluxo de Materiais), representando mais de 75% da demanda total de energia em todas as culturas. Já os insumos utilizados indiretamente representaram de 13 a 23% da demanda total de energia nas culturas.

Os insumos agrícolas possuem além das quantidades de uso variáveis (como abordado no Fluxo de Materiais) índices de energia incorporada variáveis, resultando assim, em diferentes participações na demanda total de energia dos sistemas. Portanto, um insumo utilizado em grandes quantidades não representa necessariamente a maior demanda de energia

e vice-versa. Observa-se a participação dos insumos na demanda total de energia dos sistemas, sem distinção de classes de consumo (Tabela 11).

Tabela 11 - Participação dos insumos na demanda total de energia dos sistemas de produção

Cultura	Demanda anual de energia dos insumos (% do total)					
	Fertilizantes	Diesel	Defensivos	Calcário	Sementes	Maquinário
Milho	70,1	13,8	8,4	5,6	1,8	0,3
<i>Sorgo</i>	71,8	17,4	9,1	0,0	1,0	0,3
Aveia	60,3	15,2	5,5	9,1	9,2	0,4
Azevém	69,7	13,1	4,6	7,5	4,7	0,3
Cevada	62,4	14,3	5,8	7,6	9,6	0,3
Milheto	65,8	18,5	4,0	8,6	2,7	0,3
<i>P. Maximum</i>	57,3	23,1	0,7	18,2	0,6	0,1
Tifton 85	58,7	21,0	0,0	19,8	0,0	0,5

Os fertilizantes representaram a maior porção da demanda total de energia dos sistemas, com mais de 50% de participação em todas as culturas.

A segunda maior demanda de energia dos sistemas é representada pelo diesel, utilizado nas operações mecanizadas, com valores entre 13% e 24% da demanda total de energia. Nas operações mecanizadas, o consumo operacional tende a aumentar à medida que se reduz a capacidade campo operacional, para um mesmo consumo horário de combustível. Para as operações de distribuição de fertilizantes, distribuição de esterco e semeadura, os consumos horários estimados das operações citadas apresentaram-se semelhantes, contudo a operação que apresentou maior consumo por área foi a distribuição de esterco, por apresentar a menor capacidade operacional. Ressalta-se também a importância da energia incorporada do diesel, 45 MJ L^{-1} , contribuindo assim para sua participação nas demandas de energia dos sistemas.

Os defensivos e o calcário apresentaram participações intermediárias na demanda total de energia em relação aos outros insumos. O calcário é um insumo utilizado em altas doses ($500 \text{ a } 1000 \text{ kg ha}^{-1}$), porém é um insumo que possui baixa energia incorporada ($1,67 \text{ MJ kg}^{-1}$). Os defensivos, os quais apresentam altos valores de energia incorporada (considerada a energia incorporada do princípio ativo, $115 \text{ a } 350 \text{ MJ kg}^{-1}$), são utilizados em pequenas quantidades por área, portanto, não representando uma alta demanda de energia em relação ao total (CLEMENTS et al., 1995).

Sementes representam a segunda menor participação na demanda de energia nas culturas, com valores entre 0,6% (para *P. maximum*, valor anualizado) e 9,6% das demandas

totais. A participação apresenta uma grande variação, devido à variação também da quantidade deste insumo utilizado nas culturas (de 25 a 100 kg ha⁻¹).

A menor participação no consumo de energia é oriunda do maquinário utilizado, aqui representado por meio de sua depreciação. Esse fato se deve à vida útil destes equipamentos, que proporciona que estes sejam utilizados por anos em diversas operações e culturas.

Com relação aos fertilizantes, na Tabela 12, observa-se a demanda de energia por parte de cada tipo de fertilizante utilizado nas culturas.

Tabela 12 – Participação dos fertilizantes na demanda total de energia dos sistemas de produção

Culturas	Fertilizantes ¹		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Milho	52,3%	6,8%	11,0%
Sorgo	60,7%	4,4%	7,2%
Aveia	47,9%	3,3%	9,1%
Azevém	55,0%	2,7%	12,0%
Cevada	55,4%	2,7%	4,3%
Milheto	63,0%	1,5%	1,4%
<i>P. Maximum</i>	56,2%	0,5%	0,5%
Tifton 85	58,7%	0,0%	0,0%

¹ Refere-se à demanda anual de energia do elemento/composto ativo do fertilizante.

Observa-se a importância da participação do fertilizante nitrogenado em relação aos demais, sendo que essa participação se deve principalmente ao seu conteúdo energético, 56,3 MJ kg⁻¹, alto em relação aos demais (7,5 e 7,0 MJ kg⁻¹ para P₂O₅ e K₂O, respectivamente), oriundo do processo de extração e industrialização. Também se pode observar que o fertilizante nitrogenado é o único que é utilizado em todas as culturas, portanto onerando o consumo de energia dos sistemas de produção por parte do uso de fertilizantes.

A importância do uso de fertilizantes e do diesel no enfoque energético de sistemas de produção está de acordo com diversos autores (ZENTNER; STUMBORG; CAMPBELL, 1989; HULSBERGEN et al., 2001; OLIVEIRA; VAUGHAN; RYKIEL JR, 2005). Golmann et al. (2004), Rathke; Diepenbrock (2006), e Rathke et al. (2007) encontraram a maior demanda de energia em sistemas de produção agrícola oriunda do uso de fertilizantes, sendo esse seguido do diesel. Esses autores analisaram cultivos de trigo, canola, e rotação de milho-soja, respectivamente, até a colheita. A cultura da soja, por sua vez, apresentou maior demanda de energia devido ao uso do diesel, visto sua menor necessidade de fertilizante nitrogenado, sendo esses a segunda maior demanda de energia (RATHKE et al., 2007). Campos et al. (2004; 2005) encontraram a maior participação na demanda de energia para o

diesel utilizado, pois avaliaram além da fase de produção agrícola de duas forrageiras de pequeno porte, a fase de fenação, que por sua vez apresentou alto consumo de combustível em relação ao restante do processo, devido ao uso de máquina enfardadora.

Em relação às operações mecanizadas, determinaram-se as suas demandas totais de energia ao atribuir a essas, a energia incorporada do maquinário, diesel e insumo aplicado, específico a cada operação (Tabela 13).

Tabela 13 – Participação das operações mecanizadas na demanda total de energia dos sistemas de produção

Cultura	Demanda anual de energia nas operações mecanizadas (% do total)					
	Pulverização	Distribuição de fertilizante	Semeadura	Distribuição de esterco	Distribuição de calcário	Colheita
Milho	9,5%	53,7%	22,7%	4,1%	5,8%	4,1%
Sorgo	10,3%	47,3%	30,2%	6,1%	0,0%	6,0%
Aveia	6,9%	42,5%	31,4%	6,7%	9,5%	2,9%
Azevém	5,7%	55,4%	23,0%	5,5%	7,8%	2,4%
Cevada	8,5%	47,5%	28,0%	5,6%	7,9%	2,4%
Milheto	5,3%	58,2%	14,9%	6,3%	9,0%	6,3%
<i>P. Maximum</i>	0,8%	56,2%	4,3%	13,2%	18,9%	6,7%
Tifton 85	-	61,7%	-	14,6%	20,5%	3,2%

Para todas as culturas a distribuição de fertilizante foi a operação que mais demandou energia em relação às demais operações, com mais de 42% da demanda total em todas as culturas.

A alta demanda de energia da distribuição de fertilizantes em relação às demais operações se deve à energia incorporada dos fertilizantes aplicados, em especial o nitrogenado. Como a distribuição de fertilizante é a operação com a segunda maior CcO (apenas menor que a CcO da pulverização), sua demanda de energia se deve principalmente aos insumos aplicados. Ressalta-se ainda que a realização de mais de uma distribuição de fertilizante na maior parte das culturas (anexos), onera a demanda de energia por parte dessa operação, porém pouco disso se deve ao diesel e maquinário utilizado, sendo, portanto devido aos fertilizantes aplicados.

A operação de semeadura apresentou os segundo maiores valores de demanda de energia, devido à sua baixa capacidade operacional e aplicação de fertilizante (formulado) na mesma operação, em todas as culturas.

Com relação à demanda de energia da distribuição de esterco, como não se considerou a energia incorporada do esterco aplicado, salienta-se que a sua demanda de energia é oriunda do uso de combustível (depreciação do maquinário apresenta valores pouco expressivos), visto que essa operação apresenta a menor capacidade operacional em relação às demais, que por sua vez onera o consumo operacional de diesel.

A colheita, relatada como a operação que apresenta a maior demanda de energia entre as operações agrícolas (ANGELINI; CECCARINI; BONARI, 2005; ANGELINI et al., 2009), no presente trabalho apresentou demanda de energia pouco expressiva. A demanda de energia da colheita se deve quase que totalmente ao uso de diesel (a depreciação do maquinário apresenta os menores valores entre os insumos avaliados) e não há a aplicação direta de insumos. Observa-se que a colheita utilizando a colhedora autopropelida (milho, sorgo, milho e *P. maximum*) apresentou maior participação na demanda de energia em relação à colhedora de forragens de menor porte.

4.3 Energia de saída (ES)

A energia de saída foi determinada com base na proporção dos componentes estruturais lignocelulósicos (celulose, hemicelulose e lignina) presentes na matéria seca e associação como seus respectivos conteúdos de energia (Anexo J) (Tabela 14).

Tabela 14 - Componentes estruturais e potencial energético disponibilizado na matéria seca das culturas avaliadas

Cultura	Produtividade (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Composição Estrutural (kg ha ⁻¹)			Energia de Saída (GJ ha ⁻¹)
		Lignina	Celulose	Hemicelulose	
Milho	16,5	561,0	4768,5	3300,0	150,1
Sorgo	9,0	360,0	2250,0	2484,0	89,0
Aveia	4,2	96,0	1064,0	840,0	34,7
Azevém	4,5	96,9	1596,0	1482,0	55,0
Cevada	6,0	180,0	1440,0	1260,0	50,1
Milheto	6,3	441,0	1701,0	1827,0	69,8
<i>P. maximum</i>	10,0	1000,0	3800,0	2600,0	130,2
Tifton 85	10,0	600,0	2500,0	3500,0	115,8

Observa-se que a cultura que apresentou a maior disponibilização potencial de energia foi a do milho. Essa é seguida por *P. maximum*, Tifton 85, sorgo, azevém, cevada e aveia,

sendo esta a cultura que apresentou a menor disponibilização de energia dos sistemas avaliados.

A cultura do milho representou a maior ES, pois é a que apresenta a maior quantidade dos componentes estruturais avaliados em sua massa seca. A cultura da aveia, devido a sua constituição, apresentou a menor quantidade desses compostos na matéria seca, sendo, portanto, a menor disponibilização de energia.

As gramíneas perenes apresentam, além de alta produtividade, maior quantidade dos componentes estruturais em sua massa seca total, visto que não possuem panículas/espigas como as demais culturas. O capim maduro, a palhada de cereais e o bagaço da cana-de-açúcar são materiais ricos em carboidratos estruturais, e esses volumosos, por sua vez, são importantes fontes de energia, pois apresentam pelo menos 70% de carboidratos, que são inaproveitados na alimentação animal, devido ao alto teor de lignina (FUKUSHIMA; HATFIELD, 2003).

A ES, contudo, não se relaciona com o consumo de energia necessário a sua disponibilização final, sendo, portanto, mais adequado aliar o seu uso a um indicador que o faça, como BE e EROI. Isso porque uma cultura pode disponibilizar grande quantidade de energia, ao mesmo tempo em que sua demanda de energia também é alta, resultando em uma baixa eficiência do uso da energia.

Deve-se lembrar de que o cálculo da ES foi feito com base nos principais componentes estruturais da biomassa, representando, assim, o potencial energético obtido por meio da termoconversão (combustão). A combustão da biomassa é responsável por mais de 90% da atual disponibilização de energia mundial, sendo que os combustíveis líquidos (e.g. etanol) apresentam pequena participação nesse tipo de uso, em nível mundial.

Sabe-se, contudo, que o uso tradicional das culturas avaliadas não é o energético, devido a fatores como a maior viabilidade econômica da produção de alimentos. No caso de culturas em que não há a possibilidade de seu uso como fonte de energia, as análises de fluxo de energia permitem, assim, o fornecimento de ferramenta para uso mais racional da energia na forma de insumos nos sistemas de produção.

Autores reportaram a ES, ou energia total disponibilizada por meio do uso da biomassa de diversas culturas (BOATENG; JUNG; ADLER, 2006; STREZOV; EVANS; HAYMAN, 2008; PROCHNOW et al., 2009; BRAUN; WEILAND; WELLINGER, 2010; POSCHL; WARD; OWENDE, 2010). Esses autores analisaram diferentes usos finais da biomassa (i.e. etanol, biodiesel, gás, carvão), por meio de seus componentes estruturais e químicos na conversão energética, proporcionando assim, resultados distintos de energia disponibilizada,

até mesmo para um mesmo material. Portanto, o tomador de decisão deve ter ciência da interpretação dos resultados para escolha do produto e rota de conversão mais adequada à sua necessidade.

4.4 Indicadores de eficiência

Por meio da associação da EE, ES e produtividade, foram calculados os indicadores de eficiência do uso da energia, BE, EROI e EI (Tabela 15).

Tabela 15 - Indicadores de eficiência do uso da energia nos sistemas de produção

Tabela 15 - Indicadores de eficiência do uso da energia nos sistemas de produção							
Cultura	Produtividade	Energia		Indicadores			
	t ha ⁻¹ ano ⁻¹ (MS)	Entrada	Saída	-----BE-----	EROI	EI	
		<u>GJ ha⁻¹ano⁻¹</u>		GJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	GJ ha ⁻¹ dia ⁻¹	-	MJ kg ⁻¹
Milho	16,5	14,8	150,1	135,2	0,90	10,1	0,90
Sorgo	9,0	10,1	89,0	78,9	0,66	8,9	1,11
Aveia	4,2	9,2	34,7	25,6	0,17	3,8	2,28
Azevém	4,5	11,1	55,0	43,9	0,29	5,0	1,95
Cevada	6,0	11,0	50,1	39,2	0,26	4,6	1,83
Milheto	6,3	9,7	69,8	60,1	0,46	7,2	1,54
¹ P. <i>Maximum</i>	10,0	9,2	0,0	121,0	0,67	14,2	0,92
Tifton 85	10,0	8,5	115,8	107,4	0,72	13,7	0,85

¹ Refere-se à média de todos os anos.

4.4.1 Balanço Energético (BE)

A cultura do milho foi a que apresentou o maior valor de BE, portanto a cultura que disponibilizou maior quantidade de energia líquida por área. Essa apresentou valores 11%, 25%, 71%, 124%, 207%, 244% e 428% superiores aos das culturas do *P. maximum*, Tifton 85, sorgo, milheto, azevém, cevada e aveia, respectivamente.

Os valores de BE apresentados nesse estudo apresentam grande variação, visto que são apresentadas diversas culturas. As culturas do milho, *P. maximum*, Tifton 85 e sorgo apresentaram os maiores, e, portanto, mais favoráveis do ponto de vista energético, valores de BE. Já as culturas da aveia, azevém, cevada e milheto apresentaram os menores valores de BE em relação às demais culturas.

Os valores apresentados estão de acordo com valores já reportados anteriormente por outros autores, para diversas culturas (ANGELINI; CECCARINI, BONARI, 2005; KOGA, 2008; ANGELINI et al., 2009) calculados para a fase agrícola da produção de biomassa. Angelini; Ceccarini e Bonari (2005) relataram valor médio de 400 GJ ha⁻¹ de BE no cultivo de cana-do-reino (valor devido a diversas doses de fertilizantes aplicadas). Koga (2008) relatou BE variando de 20 a 310 GJ ha⁻¹ no cultivo de culturas em rotação: feijão, trigo, batata e beterraba. Angelini et al. (2009) relatou um valor médio de BE de 182 GJ ha⁻¹ no cultivo de herbáceas perenes.

A fase agrícola possui destaque no uso de recursos e demanda energética total do sistema (MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008; CAVALETT; ORTEGA, 2010) devendo ser cuidadosamente analisada e manejada, porém ressalta-se também a importância da análise das fases pós-colheita, de maneira a representar a eficiência total num sistema de disponibilização de energia. Oliveira; Vaughan e Rykiel JR, (2005) relataram valor de 113 GJ ha⁻¹ e 7 GJ ha⁻¹ para todo o processo de produção do etanol da cana-de-açúcar no Brasil, e etanol do milho, nos EUA, respectivamente. Ressalta-se aqui a importância da avaliação das fases pós-colheita da biomassa no fornecimento exato da eficiência do uso energético da matéria prima avaliada.

O BE não aborda a questão do tempo utilizado para a disponibilização de energia, portanto ao comparar valores de BE das culturas anuais com as perenes, está sendo feita uma superestimativa para as culturas anuais, visto que essas são cultivadas durante a época do ano mais propícia ao seu crescimento. Já as culturas perenes permanecem no campo o ano todo, inclusive na época menos favorável ao seu crescimento, ocupando a área.

O BE também foi calculado em base diária, para fins de comparação de ocupação da área entre as culturas anuais e perenes. Observa-se nessa questão, que as culturas perenes apresentam valores de BE diários similares ao do sorgo, e o segundo maior entre todas as culturas. Porém, como já observado, essas culturas ocupam a área o ano todo, enquanto que as anuais com os maiores valores de BE disponibilizam similar quantidade de energia em menor espaço de tempo. Há de se considerar, contudo, que as culturas anuais devem ser implantadas todo ano, fato que não ocorre nas culturas perenes. Por isso, ressalta-se a importância da comparação detalhada entre culturas anuais e perenes no enfoque energético, analisando os fatores inerentes ao seu ciclo que afetam diretamente na demanda e disponibilização de energia.

Uma cultura anual, para ser considerada eficiente do ponto de vista energético, deve apresentar alta produtividade e consumo de energia que não torne o processo de produção de biomassa ineficiente em termos energéticos. A cultura do milho é um exemplo de alta

demanda de energia, porém que foi “superada” pela alta produtividade da cultura, e eficiência no uso e disponibilização de energia em relação às demais culturas. Sorgo, apesar de menor produtividade, demanda e disponibilização de energia que a cultura do milho, também apresentou resultados energeticamente favoráveis. As culturas da aveia, avevém, cevada e milho, apresentaram, além de demanda de energia similar à da cultura do sorgo, e maior que a demanda das perenes, menores produtividades e disponibilização de energia, contribuindo, portanto, para seus menores valores de eficiência energética. Já as culturas perenes apresentaram as menores demandas de energia, segunda maior produtividade, que facilitada pelas suas composições estruturais, resultaram em valores favoráveis em relação às outras culturas na eficiência do uso e disponibilização de energia.

4.4.2 EROI

O EROI dos sistemas de produção demonstrou que as culturas do *P. maximum*, Tifton 85, milho e sorgo, apresentaram, nessa mesma ordem, os maiores valores, portanto, indicando as maiores rentabilidades energéticas entre as culturas avaliadas. Isso quer dizer que essas culturas utilizaram menor fração da energia disponibilizada na manutenção de seus processos de produção. O valor obtido para *P. maximum* apresentou-se 3%, 40%, 59%, 97%, 184%, 208% e 273% superior aos das culturas do Tifton 85, milho, sorgo, milho, avevém, cevada e aveia, respectivamente.

Para *P. maximum* e Tifton 85, isso se deve à alta produção de matéria seca das culturas em relação às demais (atrás apenas da produção de milho, $t\ ha^{-1}$) e baixas demandas de energia em relação às outras culturas. Na cultura do sorgo, isso se deve ao fato de que esta cultura apresentou-se entre os quatro menores valores de demanda de energia, e entre os quatro maiores valores de disponibilização de energia, contribuindo para um alto valor na relação ES/EE entre as demais culturas. A cultura de milho apresentou valores que mostram que a cultura demandou grande quantidade de energia, mas ao mesmo tempo disponibilizou grande quantidade de energia, contribuindo portanto, para altos valores de eficiência entre as culturas.

Os valores de EROI aqui apresentados são altos em relação a alguns reportados na literatura, (CAMPOS et al., 2004; CAMPOS et al., 2005; OLIVEIRA; VAUGHAN; RYKIEL 2005). Esses autores relataram EROI de 3,19; 4,3; 3,66 e 1,09, nos processos de produção de feno de alfafa, feno de cultivar de *Cynodon* spp., etanol da cana-de-açúcar no Brasil, e etanol do milho nos EUA, respectivamente. Salienta-se, porém que os trabalhos citados

consideraram as etapas de transporte, pré-tratamento e disponibilização final da energia. Neste trabalho considerou-se do preparo do solo à colheita, não sendo consideradas as etapas pós-colheita.

Ao realizar comparação com os valores de EROI reportados para a produção de etanol da cana-de-açúcar (processo considerado eficiente em termos energéticos), Macedo, (1998) e Oliveira; Vaughan e Rykiel JR, (2005) relataram valores de EROI de 9,2 e 3,66, respectivamente. Nota-se, portanto, assim como para o BE, que as culturas do milho, *P. maximum*, Tifton 85, e sorgo, apresentaram valores de EROI que podem configurar um possível potencial de fonte eficiente de energia. Reforça-se a necessidade do estudo detalhado da eficiência energética dos processos pós-colheita, incluindo as rotas de transformação (McKENDRY, 2002b; ROMANELLI ; RAUCCI, 2011; SAIDUR et al., 2011) dessas culturas. Ainda, estudos desse enfoque poderiam ser realizados com outras culturas alternativas à cana de açúcar e eucalipto, de acordo com características e aptidões regionais.

4.4.3 Energia Incorporada (EI)

A cultura do Tifton 85 apresentou o menor valor de EI entre as culturas, indicando ser a cultura que utilizou menor quantidade de energia na produção de uma unidade de massa de matéria seca. Essa foi seguida pelas culturas do milho e *P. maximum*, sorgo, milheto, cevada, avevém e aveia, sendo essa última a que mais utilizou energia na produção de uma unidade de massa de matéria seca.

Nota-se que as culturas com os maiores índices de produtividade (milho, sorgo, Tifton 85 e *P. maximum*, 9 a 16 t ha⁻¹) também apresentam os menores valores de EI (0,9; 1,1; 0,8 e 0,9 respectivamente) indicando melhor eficiência do uso da energia na produção de biomassa em relação às demais culturas. A demanda total de energia dos sistemas (mesmo sendo a mais alta, como a da cultura do milho) é melhor utilizada pelas culturas com os maiores índices de produção de matéria seca por área, proporcionando assim um uso mais eficiente da energia na produção de MS (menores índices de EI).

As culturas com os menores índices de produtividade, aveia, avevém, cevada e milheto (4 a 6 t ha⁻¹) apresentaram os maiores valores de EI (2,3; 1,9; 1,8 e 1,5 respectivamente) indicando que essas foram as culturas que utilizaram a energia de maneira menos eficiente na produção de matéria seca em relação às outras culturas.

Nas referências, o uso da EI é mais difundido nos produtos energéticos em forma final, já processados, como etanol, biodiesel, carvão (WORLEY; VAUGHAN; CUNDIFF, 1992;

FORE; PORTER; LAZARUS, 2011; AGOSTINHO; PEREIRA, 2013), e poucos resultados são encontrados para a biomassa na fase agrícola (ROMANELLI; MILAN, 2010b; FORE; PORTER; LAZARUS, 2011). Salienta-se aqui a importância da determinação da EI na biomassa, de maneira a complementar o conhecimento sobre o uso da energia nos sistemas agrícolas em geral.

O caso de valores muito próximos, como para o milho e para o sorgo, evidencia a importância da análise de outros indicadores de eficiência, como o BE e EROI, podendo dessa maneira interpretar de maneira mais completa como é a demanda e uso da energia pela cultura na produção de biomassa. Ressalta-se, no entanto, que essas são análises específicas, e que cabe ao usuário identificar qual cultura proporcionará uso mais adequado, considerando pré-tratamento, processo de conversão e produto final possíveis de serem realizados.

4.5 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade identificou o impacto do uso de insumos na demanda total de energia dos sistemas. Optou-se por apresentar as operações cujas variações dos insumos excederam 1% na demanda total de energia de cada sistema. Assim, as operações que apresentaram essas condições foram: distribuição de fertilizante com variação do insumo direto, o fertilizante, (DF/I); distribuição de fertilizante com variação do insumo indireto, o diesel, (DF/D); semeadura com variação no insumo direto, fertilizantes e sementes, (S/I); semeadura com variação no insumo indireto, o diesel, (S/D); distribuição de calcário com variação no insumo direto, o calcário, (DC/I); e distribuição de calcário com variação no insumo indireto, o diesel (DC/D). Considerando-se a EE de cada sistema como sendo 100 (valor base), observa-se na Tabela 16 a variação neste indicador de cada cultura, devido do aumento do uso dos insumos em 10%.

Tabela 16 – Análise de sensibilidade de operações mecanizadas

Cultura	Alteração na Energia de Entrada (%)					
	Distribuição de fertilizante		Semeadura		Distribuição de calcário	
	I	D	I	D	I	D
Milho	5,3	0,1	2,0	0,3	0,6	0,0
Sorgo	4,7	0,1	2,7	0,3	-	-
Aveia	4,2	0,1	2,8	0,3	0,9	0,0
Azevém	5,3	0,1	2,0	0,3	0,7	0,0
Cevada	4,7	0,1	2,5	0,3	0,8	0,0
Milheto	5,7	0,1	1,2	0,3	0,9	0,0
<i>P. maximum</i>	5,4	0,2	0,4	0,1	1,8	0,1
Tifton 85	5,9	0,3	-	-	2,0	0,1

* I = insumo diretamente aplicado (fertilizantes, calcários, sementes); D = diesel.

A demanda de energia (EE) foi o parâmetro utilizado na análise de sensibilidade. Não foram apresentados os valores da alteração na demanda de energia pela alteração na depreciação de maquinário nas operações, por esses terem sido muito baixos em relação aos demais (0,001% a 0,07% no aumento da demanda de energia das operações).

A distribuição de calcário apresentou variação maior que 1% apenas nas cultivares de *P. maximum* e Tifton 85, quando foi alterada a quantidade de insumo aplicado (o calcário). Isso porque nessas duas culturas, a aplicação de calcário é o dobro das demais culturas (1000 e 500 kg, respectivamente). A alteração no consumo de diesel provocou aumento de 0,1% na demanda de energia dessa operação nas culturas perenes.

Na semeadura, ao variar-se o uso de insumos aplicados diretamente (sementes e fertilizantes), apresentou-se aumento superior a 1% na demanda de energia em todas as culturas, exceto *P. maximum*, pois os valores são referentes a uma média anualizada. Já a alteração no consumo de diesel nessa operação, provocou aumento entre 0,1% e 0,3% das demandas totais de energia.

A alteração nos insumos da distribuição de fertilizante apresentou a maior variação na demanda de energia entre as operações avaliadas. Porém essa maior variação foi devido à alteração dos insumos aplicados diretamente (fertilizantes). Esses apresentaram aumento na demanda de energia da operação entre 4,2% e 5,9%, representando, portanto, os fatores com maior impacto no uso da energia em todos os sistemas. Já o aumento do consumo de diesel nessa operação apresentou alteração entre 0,1% a 0,3% da demanda de energia.

A realização da análise de sensibilidade demonstrou que os insumos aplicados diretamente na operação de distribuição de fertilizante, foram os insumos de maior impacto na demanda de energia em todos os sistemas de produção. Da mesma maneira que o aumento de

10% de insumos aplicados na distribuição de fertilizantes apresentou as maiores alterações na demanda de energia da operação nos sistemas, a diminuição de 10% desses fertilizantes aplicados representa a “economia” das variações encontradas. Medidas que objetivam a substituição parcial de fertilizantes industriais, para o suprimento adequado de nitrogênio de uma cultura, por exemplo, podem ser adotadas, como a rotação de culturas com leguminosas (RATHKE et al., 2007).

5 CONCLUSÕES

O fluxo de materiais determinou que em termos de quantidade (massa), o insumo mais utilizado por unidade de área foi o calcário, exceto nas culturas do milho e azevém, nas quais os fertilizantes foram os insumos mais utilizados.

A análise dos fluxos de energia determinou os fertilizantes como sendo os insumos que mais demandam energia nos sistemas de produção. Esses são seguidos pelo diesel, calcário, sementes, defensivos e maquinário, sendo esse último o que menos demandou energia nos sistemas avaliados.

Com relação às operações mecanizadas, as que apresentaram maior consumo operacional de diesel em relação às demais foram a colheita (com colhedora autopropelida) e a distribuição de esterco.

Com relação à demanda de energia nas operações mecanizadas, essa foi maior na distribuição de fertilizantes, seguida pela semeadura.

A cultura que apresentou maior demanda de energia (EE) foi o milho, seguido do azevém, cevada, sorgo, milheto, aveia, *P. maximum* e Tifton 85.

A cultura que apresentou maior disponibilização de energia (ES) foi o milho, seguido de *P. maximum*, Tifton 85, sorgo, milheto, azevém, cevada e aveia.

Com relação à eficiência do uso e disponibilização de energia, a cultura que apresentou o melhor balanço energético (BE) foi o milho, seguido das cultivares de *P. maximum*, Tifton 85, sorgo, milheto, cevada, azevém e aveia.

Em termos de rentabilidade energética, a cultura que apresentou o melhor valor de EROI foi o *P. maximum*, seguido do Tifton 85, milho, sorgo, milheto, azevém, cevada e aveia.

Com relação à energia incorporada na biomassa (EI), a cultura mais eficiente foi o Tifton 85, seguido de milho, *P. maximum*, sorgo, milheto, cevada, azevém e aveia.

Identificou-se como as quatro culturas mais eficientes do ponto de vista energético, a cultura do milho, *P. maximum*, Tifton 85 e sorgo, pois disponibilizaram maiores quantidade de energia líquida (BE), em processos de produção mais rentáveis (EROI) da produção de matéria seca (EI) em relação às demais culturas avaliadas.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, T.; ABBASI, S.A. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 14, p. 919-937, Apr, 2010ie.
- ADELMAN, M.A. World oil production & prices 1947-2000. **The Quarterly Review of Economics and Finance**, Champaign, v.42, p.169-191, 2002.
- AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E. Integrated food, energy and environmental services production as an alternative for small rural properties in Brazil. **Energy**, Oxford, v.37, n.1, p. 103-114, Jan, 2012.
- AGOSTINHO, F.; PEREIRA, L. Support area as na indicator of environmental load: Comparison between Embodied Energy, Ecological Footprint, and Emergy Accounting methods. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v.24, p.494-503, Jan, 2013.
- ANGELINI, L.G.; CECCARINI, L.; BONARI, E. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. **European. Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 22, p. 375-389, May, 2005.
- ANGELINI, L.G.; CECCARINI, L.; NASSO, N.N.D.; BONARI, E. Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term Field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.33, p.635-643, 2009.
- ANGONESE, A.R.; CAMPOS, A.T.; ZACARKIM, C.E.; MATSUO, M.S.; CUNHA, F. Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.745-750, 2006.
- ASAE. ASAE D497.7: Agricultural machinery management data. In: **ASABE standards 2003**. St. Joseph, p.391-398, 2003.
- ANSELMO FILHO, P.; BADR, O. Biomass resources for energy in North-Eastern Brazil. **Applied Energy**, London, v.77, p.51-67, 2004.
- ASSENHIEMER, A.; CAMPOS, A.T.; GONÇALVES JÚNIOR, A.C.. Análise energética de sistemas de produção de soja convencional e orgânica. **Âmbiência-Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, Guarapuava, v.5, n.3, p. 443-455, 2009.
- AZAR, C.; LARSON, E.D. Bioenergy and land-use competition in Northeast Brazil. **Energy for Sustainable Development**, Bangalore, v 4, n.3, p.64-71, 2000.
- BLACK, M.J.; WHITTAKER, C.; HOSSEINI, S.A.; DIAZ-CHAVEZ, R.; WOODS, J.; MURPHY, R.J. Life Cycle Assessment and sustainability methodologies for assessing industrial crops, processes and end products. **Industrial Crops and Products**, London, v.34, n.3, p. 1332-1339, Nov, 2011.

BLASCHEK, H.P.; EZEJI, T.C.; SCHEFFRAN, J. Biofuels from agricultural wastes and byproducts: An introduction. In: **Biofuels from agricultural wastes and byproducts**. Iowa: 1 ed. Wiley-Blackwell, 2010. chap. 1, p.3-9.

BOATENG, A.A.; JUNG, H.G.; ADLER, P.R. Pyrolysis of energy crops including alfalfa stems, reed canarygrass, and eastern gamagrass. **Fuel**, London, v.85, p. 2450-2457, 2006.

BORJESSON, P.I.I.; Energy analysis of biomass production and transportation. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 11, n.4, p. 305-318, 1996.

BOUSTEAD, I.; HANCOCK, G.F. **Handbook of industrial energy analysis**. New York: Halsted Press. 1979. 422p.

BRAUN, R.; WEILAND P.; WELLINGER, A. (2010) Biogas from energy crop digestion: International Energy Association, bioenergy task 37. Disponível em: <http://www.iea-biogas.net/_download/energycrop_def_Low_Res.pdf>. Acesso em: 20 Fev 2013

BRITO, J.O.; CINTRA, T.C. Madeira para energia no Brasil: realidade, demanda estratégica e demandas de ações. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v.1, n.2, p.157-163, 2004.

BROWN, W.F.; ADJEI, M.B. Urea ammoniation effects on the feeding value of guineagrass (*Panicum maximum*) hay. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 73, p.3085-3093, 1995.

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

BRYAN, B.A.; KING, D.; WANG, E. Potential of woody biomass production for motivating widespread natural resource management under climate change. **Land Use Policy**, Guildford, v.27, p.713-725, 2010.

BURATTI, C.; FANTOZZI, F. Life cycle assessment of biomass production: Development of a methodology to improve environmental indicators and testing with fiber sorghum energy crop. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.34, p.1513-1522, 2010.

CAMPOS, A.T. **Balanco energético relativo à produção de feno de “coast-cross” e alfafa em sistema intensivo de produção de leite**. 2001. 267p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho” , Botucatu, 2001.

CAMPOS, A.T.; CAMPOS, A.T. de. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p. 1977-1985, Nov-Dec, 2004.

CAMPOS, A.T.; KLOSOWSK, E.S.; SOUZA, C.V.; ZANINI, A.; PRESTES, T.M.V. Análise energética da produção de soja em sistema de plantio direto. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.2, n.2, p. 38-44, 2009.

CAMPOS, A.T.; SAGLIETTI, J.R.C.; CAMPOS, A.T.; BUENO, O.C. Análise energética na produção de feno de *Cynodon dactylon* (L.) PERS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.349-358, 2005.

CAMPOS, A.T.; SAGLIETTI, J.R.C.; BUENO, O.C.; CAMPOS, A.T.; KLOSOWSKI, E.C.; GASPARINO, E. Balanço energético na produção de feno de alfafa em sistema intensivo de produção de leite. **Ciência Rural**, Santa Maria. v. 34, n.3, p.245-251, 2004.

CARMO, M.S.; COMITRE, V. Evolução do balanço energético nas culturas de soja e milho no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 29., 1991, Campinas. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 1991. p.131-149.

CARPENTIERI, A.E.; LARSON, E.D.; WOODS, J. Future biomass-based electricity supply in Northeast Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.4, n.3, p. 149-173, 1993.

CARVALHO, P.C.F.; SANTOS, D.T.; GONÇALVES, E.N.; MORAES, A.; NABINGER, C. Forrageiras de clima temperado. In: FONSECA, D.M.; MARTUSCELLO, J.A. **Plantas Forrageiras**. Viçosa: Editora UFV, 2010. cap 15, p.494-537.

CASTANHO FILHO, E.P.C.; CHABARIBERY, D. 1983. **Perfil energético da agricultura paulista**. Boletim Técnico do Instituto de Economia Agrícola, São Paulo, v. 30, v. 1/2, p. 63-115.

CAVALETT, O.; ORTEGA, E. Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v.18, p.55-70, 2010.

CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. Life cycle assessment of urban waste management: Energy performances and environmental impacts. The case of Rome, Italy. **Waste Management**, Oxford, v. 28, p. 2552-2564, 2008.

CHERUBINI, F.; STROMMAN, A.H. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. **Bioresource Technology**, Essex, v.102, p. 437-451, 2011.

CLEMENTS, D.R.; WEISE, S.F.; BROWN, R.; STONEHOUSE, D.P.; HUME, H.J.; SWANTON, C.J. Energy analysis of tillage and herbicide inputs in alternative weed management systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.52, p.119-128, 1995.

COLLINS, M.; OWENS, V.N. Preservation of forage as hay and silage. In: BARNES, R.F.; NELSON, C.J.; COLLINS, M.; MOORE, K.J. **Forages – An Introduction to Grassland Agriculture**. Iowa: Iowa State Press, 2003, chap 19, p.443-471.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, sétimo levantamento, abril 2012**. Disponível em: <www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/9fraos8.6.10.pdf> Acesso em: 15 set. 2012.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S. GÓMEZ, E.O. Caracterização da biomassa. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S. GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. Unicamp, 2008. cap 2 p. 31-60.

DAVILA-GOMEZ, F.J.; CHUCK-HERNANDEZ, C.; PEREZ-CARRILLO, E.; ROONEY, W.L.; SERNA-SALDIVAR, S.O. Evaluation of bio-ethanol production from five different varieties from sweet and forage sorghums (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.33, p.611-616, 2011.

DEMIRBAS, M.F.; BALAT, M.; BALAT, H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 50, p. 1746-1760, Aug, 2009.

DHILLON, R.S.; WUEHLISCH, G. V. Mitigation of global warming through renewable biomass. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 48, p.75-89, 2013.

DOERING III, O.C. Accounting for energy farm machinery and buildings. In: PIMENTEL, D. **Handbook of Energy Utilization in Agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. cap.1, p.9-14.

ELAURIA, J.C.; CASTRO, M.L.Y.; RACELIS, D.A. Sustainable biomass production for energy in the Philippines. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.25, p. 531-540, Nov, 2003.

EMBRAPA. **Mapa pedológico do Estado do Paraná**. Arquivo digital. Rio de Janeiro: CNS/EMBRAPA, 2002.1 CD-ROM.

EMPRESA de PESQUISA ENERGETICA. **Balanco Energético Nacional – Relatório Final – 2012 ano base 2011**. Disponível em: < <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2012.aspx> >. Acesso em: 25 jan. 2013

ERGUDENLER, A.; GHALY, A.E. A comparative study on the thermal decomposition of four cereal straws in a oxidizing atmosphere. **Bioresource Technology**, Essex, v.50, p.201-208, 1994.

FAAIJ, A.P.C. Bio-energy in Europe: changing technology choices. **Energy Policy**, Surrey, v. 34, p. 322-342, Mar, 2006.

FAO. **FAOSTAT: ForeSTAT**. Rome, 2011. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/626/default.aspx#ancor>> Acesso em: 20 Jan. 2012.

FAO. **FAO Statistical year book 2012**. World food and agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations: 362 p. 2012.

FELFLI, F.F.; MESA, J.M.; ROCHA, J.D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C.A.; PIPPO, W.A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.35, p. 236-242, Jan, 2011.

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

FILHO, P.A.; BADR, O. Biomass resources for energy in North-Eastern Brazil. **Applied Energy**, London, v. 77, p.51-67, Jan, 2004.

FILYA, I. Nutritive value and aerobic stability of whole crop maize silage harvested at four stages of maturity. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v.116, p.141-150, 2004.

FLORES, R.A. **Produção de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) para fins energéticos no cerrado: reposta a adubação nitrogenada e idade de corte**. 2009. 66p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

FORE, S.R.; PORTER, P.; LAZARUS, W. Net energy balance of small-scale on-farm biodiesel production from canola and soybean. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.35, p. 2234-2244, 2011.

FRANZESE, P.P.; RYDBERG, T.; RUSSO, G.F.; ULGIATI, S. Sustainable biomass production: A comparison between gross energy requirement and emergy synthesis methods. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v.9, n.5, p. 959-970, Nov, 2009.

FUKUSHIMA, R.S.; HATFIELD, R.D. Um novo método analítico para a determinação do teor de lignina em produtos vegetais. In: VIII ENCONTRO NACIONAL SOBRE MÉTODOS DOS LABORATÓRIOS DA EMBRAPA, .8, 2003, Jaguariúna. **Anais...Jaguariúna**. 2003. p.1-36.

GAGNON, N.; HALL, C.A.S.; BRINKER, L. A preliminary investigation of energy return on energy investment for global oil and gas production. **Energies**, Paris, v. 2, p. 490-503, 2009.

GIAMPIETRO, M.; CERRETELLI, G.; PIMENTEL, D. Energy analysis of agricultural ecosystem management: human return and sustainability. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 38, p. 219-244, 1992.

GIMENEZ, L.M. **Diagnóstico da mecanização em uma região produtora de grãos**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

GOLLMANN, P.; CAMPOS, A.T.; KLEIN, J. **Energy inputs and outputs in the wheat production at different localizations**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100029&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 28 Fev. 2013.

GOMES, F. Sorgo sacarino cresce de olho no potencial do mercado de etanol. **O Estado de S. Paulo**, São Paulo, 21 set. 2012. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/economia-geral-economia,sorgo-sacarino-cresce-de-olho-no-potencial-do-mercado-de-etanol,127788,0.htm>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

GUSTAVSSON, L.; HOLMBERG, J.; DORNBURG, V.; SATHRE, R.; EGGERS, T.; MAHAPATRA, K.; MARLAND, G. Using biomass for climate change mitigation and oil use reduction. **Energy Policy**, Surrey, v.35, p.5671-5691, 2007.

INNOCENTE, A.F. **Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar – Estudo de caso**. 2011. 111p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2011.

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

HALL, C.A.S.; BALOGH, S.; MURPHY, D.J.R. What is the minimum EROI that a sustainable society must have? **Energies**, Paris, v. 2, p. 25-47, 2009.

HERENDEEN, R.A. Energy analysis and EMERGY analysis-a comparison. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 178, p. 227-237, Nov, 2004.

HINRICHES, R.A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. Tradução da 3a Edição norte-americana de Leonardo Freire de Melo. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.543p.

HINTERBERGER, F.; GILJUM, S.; HAMMER, M. Material flow accounting and analysis (MFA). A Valuable tool for analyses of society-nature interrelationships. **Internet Encyclopedia of Ecological Economics**. 2003.Disponível em : < <http://seri.at/wp-content/uploads/2009/09/Material-Flow-Accounting-and-Analysis-MFA.-Encyclopaedia-of-the-International-Society-for-Ecological-Economics-ISEE.pdf>> Acesso em: 10 out. 2012.

HULSBERGEN, K-J.; FEIL, B.; BIERMANN, S.; RATHKE, G-W.; KALK, W-D.; DIEPENBROCK, W. A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.86, p.303-321, 2001.

IFIAS. **Energy Analysis Workshop on Methodology and Conventions**. International Federation of Institutes for Advanced Study, Nobel House, Stockholm, Sweden, 1974. 89p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY- (2012). **Energy efficiency indicators**. Disponível em: <http://www.iea.org/topics/energyefficiencyindicators/>. Acesso em: 18 jul.2012.

INSTITUO de PESQUISAS TECNOLÓGICAS – **Manual de Recomendações: conservação de energia na indústria de fertilizantes**. São Paulo, 1985.

JANK, L.; MARTUSCELLO, J.A.; EUCLIDES, V.P.B.; VALLE, C.B.; RESENDE, R.M.S. *Panicum maximum*. In: FONSECA, D.M.; MARTUSCELLO, J.A. **Plantas Forrageiras**. Viçosa: UFV, 2010. cap 5, p.166-196.

KLOPFENSTEIN, T.J.; ERICKSON, G.E.; BERGER, L.L. Maize is a critically important source of food, feed, energy and forage in the USA. **Field Crops research**, Amsterdam, v.147, 2013. No prelo.

KOGA, N. An energy balance under a conventional crop rotation system in northern Japan: Perspectives on fuel ethanol production from sugar beet. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 125, p.101-110, 2008.

KOH, M.P.; HOI, W.K. Sustainable biomass production for energy in Malaysia. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 25, p. 517-529, Nov, 2003.

KOOPMANS, A. Biomass energy demand supply for South and South-East Asia – assessing the resource base. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.28, p. 133-150, 2005.

LAL, R. World crop residues production and implications of its use as biofuel. **Environment International**, New York, v. 31, n.4, p.575-584, May, 2005.

LEAL, M.R.L.V.; TARÁNTOLA, F.; ROGGIERO, A.; CASTRO, D.; CORTEZ, L.A.B. Produção de etanol em regiões semi-áridas. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.D.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para Energia**. Campinas: Ed. Unicamp, 2008. cap 5 p. 113-130.

LEAL, M.R.L.V.; WALTER, A.S.; SEABRA, J.E.A. Sugarcane as an energy source. **Biomass Conversion and. Biorefinery**, Amsterdam, v.3, p.17-26, 2012.

LIU, T.T.; McCONKEY, B.G.; MA, Z.Y.; LIU, Z.G.; CHENG, L.L. Strengths, weaknessness, opportunities and threats analysis of bioenergy production on marginal land. **Energy Procedia**, Amsterdam, v.5, p. 2378-2386, 2011.

LORA, E.S.; ANDRADE, R.V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v.13, p. 777-788, May, 2009.

LOCKERETZ, W. Energy inputs for nitrogen, phosphorus, and potash fertilizers. In: PIMENTEL, D. **Handbook of Energy Utilization in Agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. cap.1, p.23-24.

LONDERO, A.L.; UHDE, L.T.; DREILICH, N.D.; RUPOLLO, C.Z.; BERGOLI, L.M.G.; FERNANDES, S.B.V.; SILVA, G.M.; WRITZI, A.C.; SCHNEIDER, R.F. Atributos de solo em superfície em área com aveia preta consorciada com leguminosas sobressemeadas em pastagem de Tifton 85 submetida ao pastejo animal. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DA AVEIA, 33., , 2013, Pelotas. **Resumos...** Pelotas: UFPEL, 2013, p. 1-4.

MACEDO, I.de C. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.14, n.1, p.77-81, Mar, 1998.

MACEDO,I.C.; SEABRA, J.E.A.; SILVA, J.E.A.R. Green house gas emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.32, p.582-595, 2008.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 3. ed. Curitiba: Imprensa Oficial, 2002. 440p.

MAY, A.; DURÃES, F.O.M.; FILHO, I.A.P.; SCHAFFERT, R.E.; PARRELLA, R.A. C. **Sistema Embrapa de Produção Agroindustrial de Sorgo Sacarino para Bioetanol Sistema BRS1G – Tecnologia Qualidade Embrapa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2012. 120p.

McCARTNEY, D.H.; VAAGE, A.S. Comparative yield and feeding value of barley, oat and triticale silages. **Canadian Journal of Animal Science**, Ottawa, v.73, p. 91-96, 1993.

McKENDRY, P. Energy production from biomass .pt 1: overview of biomass. **Bioresource Technology**, Essex, v. 83, p.37-46, May, 2002a.

McKENDRY, P. Energy production from biomass .pt 2: conversion technologies. **Bioresource Technology**, Essex, v.83, p. 47-54, 2002b.

McLAUGHLIN, S.B.; KSZOS, L.A. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.28, p.515-535, 2005.

MOLIN, J.P.; MILAN, M. Trator-implemento: dimensionamento, capacidade operacional e custo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed) **Conservação e cultivo de solo para plantações florestais**, Piracicaba: IPEF, 2002, chap.13, p. 409-436.

MONFORTI, F.; BÓDIS, K.; SCARLAT, N.; DALLEMAND, J-F. The possible contribution of agricultural crop residues to renewable energy targets in Europe: A spatially explicit study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v.19, p.666-677, 2013.

MURPHY, D.J.; HALL, C.A.S.; POWERS, B. New perspectives on the energy return on (energy) investment (EROI) of corn ethanol. **Environmental Development and Sustainability**, New York, v. 13, p.179-202, 2011.

MURPHY, J.; BRAUN, R.; WEILAND, P.; WELLINGER, A. **Biogas from crop digestion. IEA Bioenergy Task 37 – Energy from biogas 2011**. Disponível em: <http://www.iea-biogas.net/download/publi-task37/Update_Energy_crop_2011.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2013.

MUSANGO, J.K.; BRENT, A.C. A conceptual framework for energy technology sustainability assessment. **Energy for Sustainable Development**, Bangalore, v. 15, p. 84-91, Mar, 2011.

NETO, P.H.W.; ROCHA, C.H. Caracterização da produção agropecuária e implicações ambientais nos Campos Gerais. In: MELO, M.S.; MORO, R.S.; GUIMARÃES, G.B. **Patrimônio Natural dos Campos Gerais do Paraná**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2007. cap. 19. p 181-190.

NETTO, D.A.M.; BONAMIGO, L.A. Milheto: Características da espécie e usos. In: NETTO, D.A.M.; DURÃES, F.O.M. **Milheto Tecnologias de Produção e Agronegócio**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. cap.1, p.19-33.

OLIVEIRA, M.E.D.; VAUGHAN, B.E.; RYKIEL JR, E.J. Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. **BioScience**, Washington, v.55, n.7, p. 593-602, 2005.

ORTEGA, E.; MILLER, M.; ANAMI, M.H.; BESKOV, P. From emergy analysis to public policy: soybean in Brazil. From emergy analysis to public policy: soybean in Brazil.

In: **EMERGY ANALYSIS RESEARCH: ENERGY QUALITY AND TRANSFORMITIES**, 2., **Proceedings...** Gainesville: Disponível em:

<http://www.enveng.ufl.edu/homepp/brown/syseco/default.htm>. Acesso em: 15 fev. 2013.

ORTIZ-CAÑAVATE, J.; HERNANZ, J.L. Energy for biological systems. In: **CIGR Handbook of agricultural engineering**. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1999. chap.1, v.5. p 13-42.

PARK, H.C.; HEO, E. The direct and indirect household energy requirements in the Republic of Korea from 1980 to 2000 – An input-output analysis. **Energy Policy**, Surrey, v.35, p. 2938-2851, 2007.

PATTERSON, M.G. What is energy efficiency? – Concepts, indicators and methodological issues. **Energy Policy**, Surrey, v. 24, n. 5, p. 377-390, May, 1996.

PEDREIRA, M.S.; REIS, R.A.; BERCHIELLI, T.T.; MOREIRA, A.L.; COAN, R.M. Características agrônomicas e composição química de oito híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.32, n.5, p.1083-1092, 2003.

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

PÉREZ, S.; RENEDO, C.J.; ORTIZ, A.; MAÑANA, M.; DELGADO, F.; TEJEDOR, C. Energetic density of different forest species of energy crops in Cantabria (Spain). **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.35, p.4657-4664, Nov, 2011.

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

PIMENTEL, D. Energy flows in agricultural and natural ecosystems. In: **WORKSHOP AGROECOLOGY**, 1984. Paris. **Proceedings...** Paris: CIHEAM, 1984. p. 125-136.

PÖSCHL, M.; WARD, S.; OWENDE, P. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. **Applied Energy**, London, v.87, p.3305-3321, 2010.

PROCHNOW, A.; HEIERMANN, M.; PLOCHL, M.; AMON, T.; HOBBS, P.J. Bioenergy from permanent grassland – A review: 2. Combustion. **Bioresource Technology**, Essex, v.100, p.4945-4954, 2009.

RAMETSTEINER, E.; PULZL, H.; ALKAN-OLSSON, J.; FREDERIKSEN, P. Sustainability indicator development – Science or political negotiation? **Ecological Indicators**, Amsterdam, v.11, p.61-70, 2011.

RATHKE, G-W.; DIEPENBROCK, W. Energy balance of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) cropping as related to nitrogen supply and preceding crop. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.24, p.35-44, 2006.

RATHKE, G-W.; WIENHOLD, B.J.; WILHELM, W.W.; DIEPENBROCK, W. Tillage and rotation effect on corn-soybean energy balances in eastern Nebraska. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.97, p. 60-70, 2007.

RATHMANN, R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate. **Renewable Energy**, Oxford, v. 35, p.14-22, 2010.

REBOLÉ, A.; TREVIÑO, J.; BARRO, C.; ALZUETA, C.; CABALLERO, R. Chemical changes associated with the Field drying of oat forage. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.47, p.221-226, 1996.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION, 2009. **Historic US fuel ethanol production**. Disponível em: <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/>. Acesso em: 14 Jan. 2013.

ROMANELLI, T.L. Physical and environmental approaches for energy sources. In: D'ARCE, M.A.B.R.; VIEIRA, T.M.F.S.; ROMANELLI, T.L. **Agroenergy and Sustainability**. São Paulo: Edusp, 2009. chap. 1, p. 17-34.

ROMANELLI, T.L.; MILAN, M. Material flow determination through agricultural machinery management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.67, n.4, p.375-383, 2010a.

ROMANELLI, T.L.; MILAN, M. Energy performance of a production system of eucalyptus. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.8, p.896-903, 2010b.

ROMANELLI, T.L.; NARDI, H.de S.; SAAD, F.A. Material embodiment and energy flows as efficiency indicators of soybean (*Glycine max*) production in Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n.2, p. 261-270, 2012.

ROMANELLI, T.L.; RAUCCI, G.S. Biomassa de pastagens para a produção de energia. In.: PEDREIRA, C. G. S.; MOURA, J. C.; FARIA, V. P (Ed.). **A empresa pecuária baseada em pastagens**. Piracicaba: FEALQ, p.159-187. 320 p. 2011.

SANTOS, M.L.; LIMA, O.J.; NASSAR, E.J.; CIUFFI, K.J.; CALEFI, P.S. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica, **Química Nova**, São Paulo, v.34, n.3, p.507-511, 2011.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 15, p. 2262-2289, Jun, 2011.

SCHROLL, H. Energy-flow and ecological sustainability in Danish agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 51, n.3, p.301-310, Dec, 1994.

SEABRA, J.E.A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. 2008. 298p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SEABRA, J.E.A.; MACEDO, I.C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. **Energy Policy**, Surrey, v.39, p. 421-428, Jan, 2011.

SECRETARIA de AGRICULTURA e ABASTECIMENTO do PARANÁ – Departamento de Economia Rural – SEAB/DERAL. 2012a. **Produção Agropecuária**. Disponível em: <<http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/cprbr.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2012.

SECRETARIA de AGRICULTURA e ABASTECIMENTO do PARANÁ – Departamento de Economia Rural – SEAB/DERAL. 2012b. **Valor bruto da produção rural paranaense**. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/vbp_2011.pdf> Acesso em: 25 abr 2013.

SILVA, A.N.da; ROMANELLI, T.L.; REICHARDT, K. Energy flow in castor bean (*Ricinus communis* L.) production systems. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.67, n.6, p. 737-742, 2010.

SINGH, R.; GUPTA, P.C.; SINGH, K.; PRADHAN, K. Chemical composition of forages in relation to their nutritive value. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, New Delhi, v.37, p.268-279, 1977.

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

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**, Amsterdam, v.13, p.1230-1245, 2009.

SMYTH, B.M.; MURPHY, J.D.; O'BRIEN, C.M. What is the energy balance of grass biomethane in Ireland and other temperate northern European climates? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v.13, p.2349-2360, 2009.

STREZOV, V.; EVANS, T.J.; HAYMAN, C. Thermal conversion of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum) to bio-gas, bio-oil and charcoal. **Bioresource Technology**, Essex, v. 99, p. 8394-8399, 2008.

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource Technology**, Essex, v.83, p. 1-11, 2002.

SWANTON, C.J.; MURPHY, S.D.; HUME, D.J.; CLEMENTS, D.R. Recent improvements in the energy efficiency of agriculture: case studies from Ontario, Canada, **Agricultural Systems**, Essex, v.52 ,n.4, p.399-419, 1996.

TVERBERG, G.E. Oil supply limits and the continuing financial crisis. **Energy**, Oxford, v.37, p.27-34, 2012.

ULGIATI, S. A comprehensive energy and economic assessment of biofuels: when “green” is not enough. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Amsterdam, v.20, n.1, p.71-106, 2001.

UNITED NATIONS POPULATION FUND – UNFPA. **Population of the division department of economic and social affairs of the United Nations secretariat, world population prospects** : 2011. The 2010 revision. Disponível em: <<http://www.unfpa.org/pds/trends.htm>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

VARVEL, G.E.; VOGEL, K.P.; MITCHELL, R.B.; FOLLETT, R.F.; KIMBLE, J.M. Comparison of corn and switchgrass on marginal soils for bioenergy. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.32, p. 18-21, 2008.

VENTURI, P.; VENTURI, G. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 25, p.235-255, 2003.

VERA, I.; LANGLOIS, L. Energy indicators for sustainable development. **Energy**, Oxford, v.32, n.6, p. 875-882, Jun, 2007.

WAGHORN, B.C.; SHELTON, I.D.; THOMAS, V.J. Particle breakdown and rumen digestion of fresh ryegrass (*Lolium perenne* L.) and Lucerne (*Medicago sativa* L.) fed to cows during a restricted feeding period. **British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 61, p.409-423, 1989.

WORLEY, J.W.; VAUGHAN, D.H.; CUNDIFF, J.S. Energy analysis of ethanol production from sweet sorghum. **Bioresource Technology**, Essex, v.40, p.263-273, 1992.

WRIGHT, L. Worldwide commercial development of bioenergy with a focus on energy crop-based projects. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.30, p.706-714, Aug-Sep, 2006.

ZENTNER, R.P.; STUMBORG, M.A.; CAMPBELL, C.A. Effect of crop rotations and fertilization on energy balance in typical production systems on the Canadian prairies. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 25, p. 217-232, Mar, 1989.

ANEXOS

ANEXO A - Características operacionais do sistema de produção da cultura do milho

Operação	¹ Equipamentos	Massa (kg)	¹ VU (h)	¹ CcO (ha h ⁻¹)	Pot. Req. (cv)	Depreciação (kg ha ⁻¹)	¹ Núm. Oper.	Insumo		
								Tipo	Qtd.	Und.
Pulverização	Pulverizador 2000L	1280	5500	10,9	120	0,0	4	Defensivos	9,1	L ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 90 kW	6740	10000							
Distribuição Fertilizante	Distrib. fertilizante disco duplo	2095	1500	8,1	90	0,2	2	Fertilizantes	505,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000							
Semeadura	Semeadora 7 e 8 linhas (45 cm)	3200	4000	1,1	90	0,7	1,1	Sementes	25,2	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 82 kW	4555	10000					Fertilizantes	300,0	kg ha ⁻¹
Distribuição Esterco	Distrib. esterco líquido	1250	4000	1	110	0,3	1	Esterco	-	-
	Trator 4x2 TDA 82 kW	6720	10000							
² Distribuição Calcário	Distribuidor calcário 5 a 7 ton	985	1500	3,8	90	0,2	0,25	Calcário	500,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000							
Colheita	Colhedora Autopropelida	12500	6000	4,0	440	0,5	1	-	-	-

¹ Dados fornecidos pela Fundação ABC; ² Refere-se a uma operação realizada a cada quatro anos

ANEXO B - Dados operacionais do sistema de produção da cultura do sorgo

Operação	¹ Equipamentos	Massa (kg)	¹ VU (h)	¹ CcO (ha h ⁻¹)	Pot. Req. (cv)	Depreciação (kg ha ⁻¹)	¹ Núm. Oper.	Insumo		
								Tipo	Qtd.	Und.
Pulverização	Pulverizador 2000L	1280	5500	10,9	120	0,0	3	Defensivos	7,1	L ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 90 kW	6740	10000			0,1				
Distribuição Fertilizante	Distrib. fertilizante disco duplo	2095	1500	8,1	90	0,2	1	Fertilizantes	151,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Semeadura	Semeadora 17 a 22 linhas (17 cm)	3200	4000	1,1	110	0,4	1,9	Sementes	10,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 82 kW	4555	10000			0,2		Fertilizantes	300,0	kg ha ⁻¹
Distribuição Esterco	Distrib. esterco líquido	1250	4000	1	110	0,3	1	Esterco	-	-
Colheita	Trator 4x2 TDA 82 kW	6720	10000	4,0	440	0,7	1	-	-	-
	Colhedora Autopropelida	12500	6000			0,5				

¹ Dados fornecidos pela Fundação ABC

ANEXO C - Dados operacionais do sistema de produção da cultura da aveia

Operação	¹ Equipamentos	Massa (kg)	¹ VU (h)	¹ CcO (ha h ⁻¹)	Pot. Req. (cv)	Depreciação (kg ha ⁻¹)	¹ Núm. Oper.	Insumo		
								Tipo	Qtd.	Und.
Pulverização	Pulverizador 2000L	1280	5500	10,9	120	0,0	2	Defensivos	2,9	L ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 90 kW	6740	10000			0,1				
Distribuição Fertilizante	Distrib. fertilizante disco duplo	2095	1500	8,1	90	0,2	1	Fertilizantes	261,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Semeadura	Semeadora 17 a 22 linhas (17 cm)	3200	4000	1,1	110	0,4	1,9	Sementes	80,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 82 kW	4555	10000			0,2		Fertilizantes	200,0	kg ha ⁻¹
Distribuição Esterco	Distrib. esterco líquido	1250	4000	1	110	0,3	1	Esterco	-	-
	Trator 4x2 TDA 82 kW	6720	10000			0,7				
² Distribuição Calcário	Distribuidor calcário 5 a 7 ton	985	1500	3,8	90	0,2	0,25	Calcário	500,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Colheita	Colhedora de forragem	1880	3000	1,9	90	0,3	1	-	-	-
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555,0	10000,0			0,4				

¹ Dados fornecidos pela Fundação ABC; ² Refere-se a uma operação realizada a cada quatro anos

ANEXO D - Dados operacionais do produção da cultura do azevém

Operação	¹ Equipamentos	Massa (kg)	¹ VU (h)	¹ CcO (ha h ⁻¹)	Pot. Req. (cv)	Depreciação (kg ha ⁻¹)	¹ Núm. Oper.	Insumo		
								Tipo	Qtd.	Und.
Pulverização	Pulverizador 2000L	1280	5500	10,9	120	0,0	2	Defensivos	2,9	L ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 90 kW	6740	10000			0,1				
Distribuição Fertilizante	Distrib. fertilizante disco duplo	2095	1500	8,1	90	0,2	2	Fertilizantes	447,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Semeadura	Semeadora 17 a 22 linhas (17 cm)	3200	4000	1,1	110	0,4	1,9	Sementes	50,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 82 kW	4555	10000			0,2		Fertilizantes	200,0	kg ha ⁻¹
Distribuição Esterco	Distrib. esterco líquido	1250	4000	1	110	0,3	1	Esterco	-	-
	Trator 4x2 TDA 82 kW	6720	10000			0,7				
² Distribuição Calcário	Distribuidor calcário 5 a 7 ton	985	1500	3,8	90	0,2	0,25	Calcário	500,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Colheita	Colhedora de forragem	1880	3000	1,9	90	0,3	1	-	-	-
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555,0	10000,0			0,4				

¹ Dados fornecidos pela Fundação ABC; ² Refere-se a uma operação realizada a cada quatro anos

ANEXO E - Dados operacionais do sistema de produção da cultura da cevada

Operação	¹ Equipamentos	Massa (kg)	¹ VU (h)	¹ CcO (ha h ⁻¹)	Pot. Req. (cv)	Depreciação (kg ha ⁻¹)	¹ Núm. Oper.	Insumo		
								Tipo	Qtd.	Und.
Pulverização	Pulverizador 2000L	1280	5500	10,9	120	0,0	5	Defensivos	6,9	L ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 90 kW	6740	10000			0,1				
Distribuição Fertilizante	Distrib. fertilizante disco duplo	2095	1500	8,1	90	0,2	1	Fertilizantes	241,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Semeadura	Semeadora 17 a 22 linhas (17 cm)	3200	4000	1,1	110	0,4	1,9	Sementes	100,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 82 kW	4555	10000			0,2		Fertilizantes	200,0	kg ha ⁻¹
Distribuição Esterco	Distrib. esterco líquido	1250	4000	1	110	0,3	1	Esterco	-	-
	Trator 4x2 TDA 82 kW	6720	10000			0,7				
² Distribuição Calcário	Distribuidor calcário 5 a 7 ton	985	1500	3,8	90	0,2	0,25	Calcário	500,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Colheita	Colhedora de forragem	1880	3000	1,9	90	0,3	1	-	-	-
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555,0	10000,0			0,4				

¹ Dados fornecidos pela Fundação ABC; ² Refere-se a uma operação realizada a cada quatro anos

ANEXO F - Dados operacionais do sistema de produção da cultura do milho

Operação	¹ Equipamentos	Massa (kg)	¹ VU (h)	¹ CcO (ha h ⁻¹)	Pot. Req. (cv)	Depreciação (kg ha ⁻¹)	¹ Núm. Oper.	Insumo		
								Tipo	Qtd.	Und.
Pulverização	Pulverizador 2000L	1280	5500	10,9	120	0,0	2	Defensivos	2,9	L ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 90 kW	6740	10000			0,1				
Distribuição Fertilizante	Distrib. fertilizante disco duplo	2095	1500	8,1	90	0,2	2	Fertilizantes	218,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Semeadura	Semeadora 17 a 22 linhas (17 cm)	3200	4000	1,1	90	0,4	1,9	Sementes	25,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 82 kW	4555	10000			0,2		Fertilizantes	100,0	kg ha ⁻¹
Distribuição Esterco	Distrib. esterco líquido	1250	4000	1	110	0,3	1	Esterco	-	-
	Trator 4x2 TDA 82 kW	6720	10000			0,7				
² Distribuição Calcário	Distribuidor calcário 5 a 7 ton	985	1500	3,8	90	0,2	0,25	Calcário	500,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Colheita	Colhedora Autopropelida	12500	6000	0,7	440	0,5	1	-	-	-

¹ Dados fornecidos pela Fundação ABC; ² Refere-se a uma operação realizada a cada quatro anos

ANEXO G - Dados operacionais do sistema de produção das cultivares de *Panicum maximum*¹.

Operação	² Equipamentos	Massa (kg)	¹ VU (h)	¹ CcO (ha h ⁻¹)	Pot. Req. (cv)	Depreciação (kg ha ⁻¹)	¹ Núm. Oper.	Insumo		
								Tipo	Qtd.	Und.
Pulverização	Pulverizador 2000L	1280	5500			0,00	1			
	Trator 4x2 TDA 90 kW	6740	10000	10,9	120	0,01		Defensivos ⁴	3,0	L ha ⁻¹
Distribuição Fertilizante	Distrib. fertilizante disco duplo	2095	1500			0,03	3	Fertilizantes		
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000	8,1	90	0,01			196,0	kg ha ⁻¹
Semeadura	Semeadora 17 a 22 linhas (17 cm)	3200	4000			0,07	1,9	Sementes ⁴	30,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 82 kW	4555	10000	1,1	90	0,04		Fertilizantes	200,0	kg ha ⁻¹
Distribuição Esterco	Distrib. esterco líquido	1250	4000			0,05	2			
	Trator 4x2 TDA 82 kW	6720	10000	1	110	0,11		Esterco	-	-
³ Distribuição Calcário	Distribuidor calcário 5 a 7 ton	985	1500			0,03	0,5			
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000	3,8	90	0,02		Calcário	1000,0	kg ha ⁻¹
Colheita	Colhedora Autopropelida	12500	6000	4,0	440	0,09	1	-	-	-

¹ Refere-se à média anual dos insumos utilizados na cultura; ² Dados fornecidos pela Fundação ABC; ³ Refere-se a uma operação realizada a cada dois anos; ⁴ refere-se à insumos utilizados somente no primeiro ano.

ANEXO H - Dados operacionais do sistema de produção do Tifton 85

Operação	¹ Equipamentos	Massa (kg)	¹ VU (h)	¹ CcO (ha h ⁻¹)	Pot. Req. (cv)	Depreciação (kg ha ⁻¹)	¹ Núm. Oper.	Insumo		
								Tipo	Qtd.	Und.
Distribuição Fertilizante	Distrib. fertilizante disco duplo	2095	1500	8,1	90	0,2	4	Fertilizantes	196,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Distribuição Esterco	Distrib. esterco líquido	1250	4000	1	110	0,3	2	Esterco	-	-
	Trator 4x2 TDA 82 kW	6720	10000			0,7				
² Distribuição Calcário	Distribuidor calcário 5 a 7 ton	985	1500	3,8	90	0,2	0,5	Calcário	1000,0	kg ha ⁻¹
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555	10000			0,1				
Colheita	Colhedora de forragem	1880	3000	1,9	90	0,3	1	-	-	-
	Trator 4x2 TDA 67 kW	4555,0	10000,0			0,4				

¹ Dados fornecidos pela Fundação ABC; ² Refere-se a uma operação realizada a cada dois anos

ANEXO I - Energia incorporada de insumos agrícolas

Energia incorporada de insumos agrícolas		
Tipo de insumo (unidade)	MJ unidade ⁻¹	Fonte
Fertilizantes (kg)		
N	56,3	IPT (1985)
P ₂ O ₅	7,5	IPT (1985)
K ₂ O	7,0	Lockeretz (1980)
Calcário (kg)	1,7	Pimentel (1980)
Defensivos* (kg)		
Herbicida	355,6	Seabra (2008)
Inseticida	358,0	Seabra (2008)
Fungicida	115,1	Pimentel (1980)
Sementes (kg)	10,5	Pelizzi (1992)
Diesel (L)	45,7	Boustead e Hancock (1979)
Maquinário (kg)		
Tratores	14,6	Doering III (1980)
Colhedora de forragem	13,0	Doering III (1980)
Arado	8,6	Doering III (1980)
Grade	8,3	Doering III (1980)
Semeadora	8,6	Doering III (1980)
Pulverizadores, distribuidor de fertilizante e esterco	7,3	Doering III (1980)
Equipamentos para forragem e fenação	6,3	Doering III (1980)

* Energia incorporada por kg de princípio ativo.

ANEXO J - Energia incorporada de compostos estruturais da biomassa

Componente	Poder Calorífico MJ kg ⁻¹
Celulose*	17
Hemicelulose*	17,5
Lignina*	20,1
* Santos et al, 2011.	