

### 3.

## Avaliação da cadeia do etanol da cana-de-açúcar

### 3.1

#### Estrutura Atual do Setor Sucroalcooleiro Brasileiro

A cana-de-açúcar na safra 2008/2009 foi cultivada em 7.058.629 de hectares no Brasil (Mapa, 2010), em todas as regiões geográficas do país, tendo atingido em 2008/09 uma produção de aproximadamente 570 milhões de toneladas, um quarto da produção mundial (Unica, 2010). Cerca de 40% foi utilizada para a produção de açúcar (31,5 milhões de toneladas) e 60% para etanol (27,7 milhões de m<sup>3</sup>), em 367 unidades industriais (Mapa, 2010) na safra 2008-09 (Tabela 3).

No quadro 1 se apresenta o comportamento da produção do etanol e do açúcar ao longo dos últimos 20 anos, nota-se que a produção de etanol se incrementou a partir do ano 2002 até os dias atuais, devido principalmente ao lançamento dos veículos com motores *flex fuel* (veículos biocombustíveis) e ao elevado preço da gasolina no mercado brasileiro.

As duas regiões produtoras são o Norte-Nordeste (22%) e o Centro-Sul (78%). Na Tabela 3 encontram-se dados da safra de 2008-2009 que mostram a distribuição das usinas produtoras de açúcar e de etanol nos estados brasileiros.

Observa-se um incremento na produção de etanol de 5,3 bilhões de litros na safra 2008/2009 em comparação com a safra de 2007/2008, na qual a produção foi de 22,4 bilhões de litros de etanol (Mapa, 2010).

Os números das últimas safras apontam a tendência de aumento da produção de etanol, com maior concentração no estado de São Paulo na Região Centro-Sul, que se mantém responsável por 61% do total de etanol produzido no Brasil.

Quadro 1. Produção de Etanol e de Açúcar nos últimos 20 anos.

Fonte: elaboração própria a partir da UNICA (2010) e de MAPA (2010).

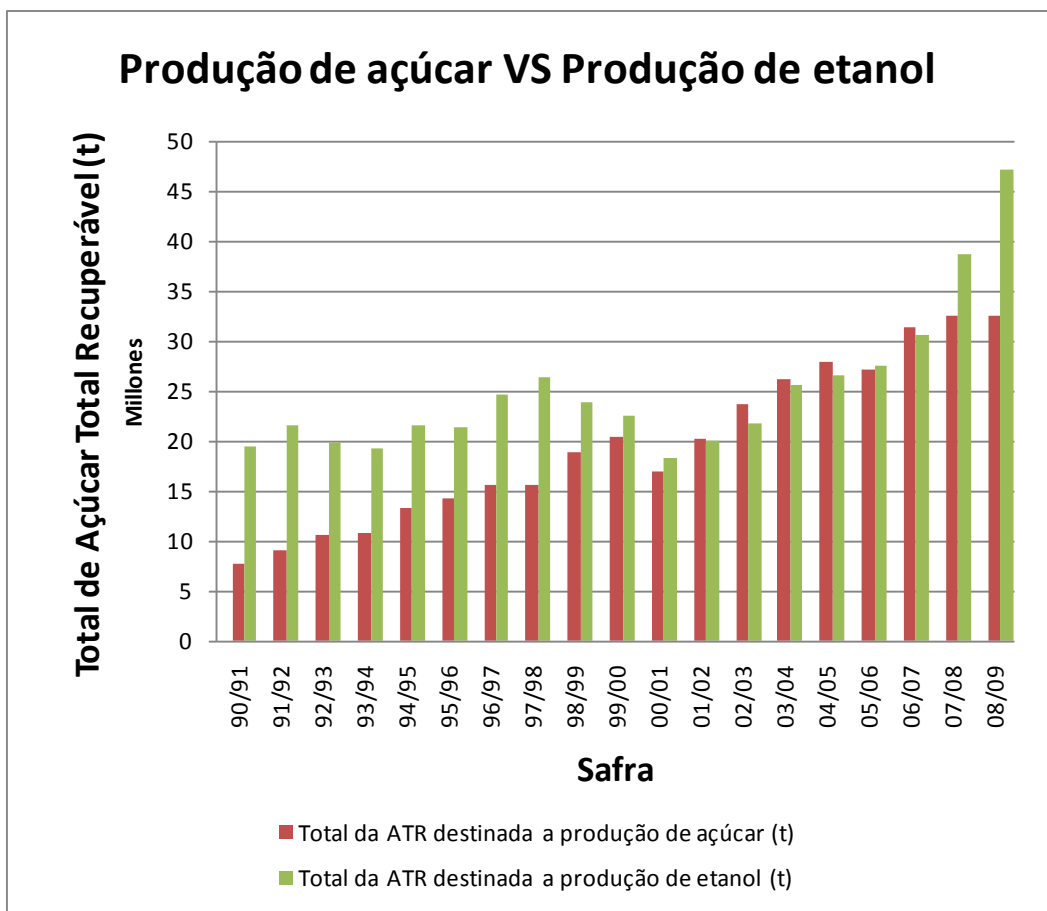


Tabela 3. Número de usinas e produção de Açúcar e Etanol na safra 2008-2009.

Fonte: elaboração própria a partir de MAPA (2010).

| Estado/Região                         | Número de Usinas | Cana moída (ton.)  | Total de açúcar total recuperável (ATR) <sup>17</sup> | Total da produção de açúcar (ton.) | Total da produção de etanol (m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------------------|------------------|--------------------|---|------------------------------------|---|
| São Paulo                             | 161              | 352.277.735        | 50.246.528  | 20.195.366                         | 16.904.039                                    |
| Paraná                                | 28               | 44.497.582         | 6.045.378   | 2.444.876                          | 2.038.399                                     |
| Minas Gerais                          | 35               | 41.818.865         | 6.140.957   | 2.238.637                          | 2.216.397                                     |
| Mato Grosso do Sul                    | 14               | 18.200.917         | 2.539.718   | 657.078                            | 1.082.882                                     |
| Goias                                 | 26               | 29.806.046         | 3.955.104   | 957.561                            | 1.722.555                                     |
| Mato Grosso                           | 11               | 14.153.762         | 1.954.449   | 389.496                            | 898.521                                       |
| Rio de Janeiro                        | 6                | 3.403.412          | 467.619   | 239.196                            | 126.452                                       |
| Espírito Santo                        | 7                | 4.373.248          | 563.736   | 85.272                             | 274.677                                       |
| <b>TOTAL DA REGIÃO CENTRO-SUL</b>     | <b>288</b>       | <b>508.531.567</b> | <b>71.913.491</b>                                     | <b>27.207.482</b>                  | <b>25.263.922</b>                             |
| Alagoas                               | 24               | 27.309.295         | 3.765.645   | 2.200.862                          | 845.363                                       |
| Pernambuco                            | 22               | 18.949.518         | 2.510.729   | 1.521.275                          | 530.467                                       |
| Paraíba                               | 8                | 5.885.978          | 814.128   | 133.883                            | 390.695                                       |
| R. Grande do Norte                    | 3                | 3.186.768          | 405.472   | 197.914                            | 114.909                                       |
| Bahia                                 | 3                | 2.541.816          | 331.015   | 81.177                             | 141.484                                       |
| Maranhão                              | 5                | 2.280.160          | 332.103   | 15.335                             | 181.559                                       |
| Piauí                                 | 1                | 900.181            | 118.514   | 38.796                             | 44.553  |
| Sergipe                               | 6                | 1.831.714          | 239.666   | 82.099                             | 89.832  |
| Ceará                                 | 3                | 122.355            | 15.675  | -                                  | 9.241   |
| Amazonas                              | 1                | 312.000            | 28.497  | 14.320                             | 7.963   |
| Tocantins                             | 2                | 285.000            | 38.806  | -                                  | 22.400  |
| Pará                                  | 1                | 626.685            | 91.809  | 13.726                             | 44.908  |
| <b>TOTAL DA REGIÃO NORTE-NORDESTE</b> | <b>79</b>        | <b>64.231.460</b>  | <b>8.692.060</b>                                      | <b>4.299.387</b>                   | <b>2.423.374</b>                              |
| <b>BRASIL</b>                         | <b>367</b>       | <b>572.763.027</b> | <b>80.605.550</b>                                     | <b>31.506.869</b>                  | <b>27.687.296</b>                             |

### 3.2

#### Ciclo de vida do Etanol da cana-de-açúcar

De forma geral, as etapas do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar podem ser resumidas em: extração da matéria-prima, produção, reciclagem do bagaço da cana, distribuição e utilização. Para o álcool combustível advindo da

<sup>17</sup> ATR representa a quantidade útil de sacarose no caldo da cana, é a matéria-prima básica do processo de fabricação dos produtos finais da cana como o açúcar e o etanol.

cana-de-açúcar, a extração da matéria-prima corresponde às atividades agrícolas do cultivo da cana-de-açúcar; a produção, a fase de transformação industrial nas usinas, desde a entrada da cana na usina até a produção do etanol, incluindo a geração de energia elétrica e o vapor; a reciclagem que é realizada por meio da fertirrigação da vinhaça; a distribuição, pelo transporte do etanol até os postos de distribuição para a venda e a utilização, pela combustão do etanol usado como combustível em veículos automotores.

A fase agrícola do processo canavieiro, admitindo que a área já tenha sido desmatada e que está sendo utilizada para a agricultura, inicia-se, de acordo com Santiago e Rossetto (2007c), pelas operações de limpeza do terreno, estudos da qualidade do solo, nivelamento, aração e gradagem do solo.

A preparação de solo segue a essas atividades que Santiago e Rosetto (2007c) definem como uma série de operações que têm por finalidade fornecer as melhores condições biológicas e físico-químicas ao solo para a germinação das sementes ou o brotamento dos tubérculos.

De acordo com Ometto (2005) o preparo periódico do solo ocorre para o plantio da cana-planta. Após o primeiro corte, ocorre o preparo para a cana-soca, o qual se repete, geralmente, por cinco cortes e finalmente, o ciclo se completa com a renovação do canavial, a qual ocorre pelo replantio. A renovação do canavial pode ser realizada pelo método mecânico ou pelo químico. Para o método mecânico, Santiago e Rosetto (2007b) enumeram as seguintes operações: aração e gradagem ou gradagem pesada, subsolagem, sulcamento e adubação.

Além da atividade de desarraigar a soqueira<sup>18</sup> de modo mecânico, pode-se utilizar também o modo químico, em conjunto com as operações de preparo de solo mediante a aplicação do herbicida, como se observa na figura 5.

---

<sup>18</sup> Conhece-se como soqueira da cana-de-açúcar, as raízes que sobraram dentro e fora da terra, após seu corte, aproximadamente a cinco centímetros do solo.



Figura 5. Operação de preparo do solo. Fonte: sacarose (2009)

De acordo com Santiago e Rosetto (2007b), a operação de plantio pode ser manual ou mecanizada, existem dois métodos para o plantio, o direto e o método convencional. No método de plantio direto, o sulco é feito por meio de um sulcador que atua sobre a palha restante, enquanto, no convencional, o terreno é preparado por operações de aração e gradagem, seguidas do sulcador no solo sem palha. O sulco é um canal de aproximadamente 25 a 30 cm de profundidade, no qual a muda de cana-de-açúcar é colocada. Quando o solo é muito compactado, utiliza-se a subsolagem para romper esse horizonte de impedimento e para facilitar a penetração e o desenvolvimento das raízes no solo.

O plantio é realizado, de modo manual, com a assistência de um caminhão que carrega a cana; os funcionários distribuem-na no sulco enquanto outros a picam em toletes, como mostra a figura 6. Este modo, associado ao preparo convencional de erradicação da soqueira, mecânico e químico, são os mais usuais na cultura canavieira.



Figura 6. Plantio manual. Fonte: Santiago e Rosetto (2007b) Foto: Efraim Albrecht Neto.

Após o plantio, segue a etapa de manejo da cultura que, segundo Santiago e Rosetto (2007a), são práticas agrícolas com as seguintes finalidades:

- Preservar ou restaurar as propriedades físicas e químicas do solo;
- Eliminar ou reduzir a concorrência das plantas invasoras;
- Conservar o sistema de controle de erosão;
- Controlar pragas ou doenças, eventualmente.

De acordo com Corbini (1987) citado em Ometto (2005), as operações de controle das ervas concorrentes podem ser:

- Preventivas: como levantamento das infestações para a identificação precoce de pequenos focos;
- Culturais: pela cobertura total do solo e por práticas de rotação com adubos verdes;
- Mecânico: podendo ser manual, com a utilização da enxada; animal, no qual os cultivadores são tracionados por animais e mecanizada por tratores;
- Cultivo químico: herbicidas, como mostra a figura 7.



Figura 7. Aplicação de herbicida com tratores. Fonte: Santiago e Rossetto (2007b).  
Foto: Raffaella Rossetto.

Segundo Santiago e Rossetto (2007a), a etapa de manejo da cultura compreende a aplicação de agrotóxicos e, quando necessário, a adubação. De acordo com Ometto (2005) os principais agrotóxicos aplicados na lavoura da cana-de-açúcar são:

- Aldrin: é um organoclorado utilizado para combater nematóides e insetos;
- Ametrina: herbicida com nomes comerciais de Gesapax, Herbipax e Metrimex;
- Atrazina: herbicida para controlar gramíneas anuais e latifoliadas;
- Clorpirifuos: inseticida considerado tóxico;
- Diflubenzuron: inseticida de baixa toxicidade;
- Diuron: segundo Arevalo (1980), herbicida do grupo da uréia, de baixa toxicidade;
- Finitrotin: inseticida de baixa toxicidade;
- Hexazinone: herbicida conhecido comercialmente como Velar K;
- Paration metil: componente ativo de alguns pesticidas organofosforados.
- Glifosato: comercialmente conhecido como Roundup;
- Simazina: herbicida com nomes comerciais de Topeze e Simetrex SC;
- Tebuthiuron: constitui um herbicida de nome comercial Perflan e Combine;
- Telrithiuron;
- Velpark.

A adubação da cultura visa adicionar os nutrientes necessários em quantidades suficientes para garantir a máxima produtividade econômica.

Os minerais obtidos do solo em maior quantidade (gramas por quilo de matéria vegetal produzida) em qualquer cultura agrícola são chamados de macronutrientes como o Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S). Os nutrientes minerais exigidos em menores quantidades (miligramas ou microgramas por quilo de matéria vegetal produzida) são os micronutrientes: Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), entre outros.

Segundo Rosetto e Santiago (2007), o canavial bem nutrido em nitrogênio apresenta-se verde e exuberante, uma vez que este nutriente estimula a brotação, e o enraizamento. A adubação fosfatada para a cana-de-açúcar é amplamente reconhecida como uma prática eficaz para elevar a produtividade dos canaviais, principalmente nos solos brasileiros, que são, em geral, pobres em fósforo. O potássio estimula a vegetação e promove o armazenamento de açúcar; ajuda na fixação do nitrogênio; regula a utilização da água e aumenta a resistência à seca, geada e moléstias.

Após as aplicações de herbicidas e inseticidas, a próxima etapa do ciclo de vida do álcool, ainda nas operações agrícolas, é a fase da colheita, na qual se utiliza a prática da queima da palha da cana-de-açúcar, prévia ao corte, em 60% das áreas com cana no Estado de São Paulo, segundo Boddey et al. (2008).

Rosetto (2007) explica o processo da queima da palha da cana-de-açúcar, ilustrada na figura 8, em três fases:

- a) Ignição: fase de início do processo, na presença de oxigênio e a baixa temperatura. Esta fase é breve e apresenta, ainda, baixa concentração de poluentes;
- b) Combustão incompleta: atinge altas temperaturas e forma gases tóxicos, como CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> (óxido de nitrogênio) e SO<sub>x</sub> (óxido de enxofre), entre outros.
- c) Resfriamento: se caracteriza pela diminuição da temperatura e pela liberação de materiais particulados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e outras substâncias orgânicas provenientes dessa combustão incompleta.





Figura 8. Queima da palha da cana-de-açúcar. Fonte: Rossetto (2007).

Foto: Jacqueline Camolese de Araújo.

A etapa da fabricação do álcool inicia-se com a entrada da cana-de-açúcar na usina, descarregada por caminhões, em esteiras que as conduzem às fases do processo industrial.

Segundo Alcarde (2007), logo no início do processo industrial, a cana é lavada com água, como mostra a figura 9, para a retirada do material unido ao colmo durante o corte e o transporte do campo à usina, surgindo o primeiro efluente: a água de lavagem de cana. Algumas usinas descartam esta operação, principalmente quando é utilizado o corte da cana crua, pois, como o colmo não exsuda, não retém tanta sujeira quanto o colmo que sofre exsudação<sup>19</sup> com a queimada – que também perde sacarose.

---

<sup>19</sup> Processo de saída de água que atravessa os poros e se deposita nas superfícies.



Figura 9. Lavagem da cana-de-açúcar. Fonte: Alcarde (2007).

Foto: Patrícia Cândida Lopes.

A eliminação dessa operação contribui para a redução de custos econômicos e ambientais, devido à não-utilização de água em excesso, já que, segundo Ometto (2005), essa etapa do processamento industrial se consome, em média, 3 a 7 m<sup>3</sup> de água por tonelada de cana.

Após a lavagem, a matéria-prima do processo industrial, a cana-de-açúcar, é submetida a uma série de facas e desfibradores para aumentar a eficiência de extração do caldo nas moendas, as quais são movidas, principalmente, por turbinas a vapor, movidas pela queima do bagaço nas caldeiras; ou por motores elétricos ou hidráulicos.

O caldo produzido durante a moagem é composto, segundo Alcarde (2007), por uma solução contendo sacarose, açúcares redutores<sup>20</sup> e não-açúcares<sup>21</sup>. Este caldo passa por um tratamento, por aquecimento e decantação, subdividindo-se no processo de produção, em açúcar e em álcool, quando a usina gera os dois produtos. O lodo resultante da decantação é submetido à filtração a vácuo. O líquido da filtração retorna ao processo e o resíduo sólido, conhecido por torta de filtro, é destinado à fertilização nos campos de cultivo de cana-de-açúcar.

---

<sup>20</sup> Os açúcares redutores são compostos por frutose e glicose

<sup>21</sup> Os não açúcares são compostos por substâncias orgânicas e não orgânicas. As orgânicas são os aminoácidos, proteínas, gordura e cera; os não orgânicos são compostos por sais minerais

O caldo obtido no processo de extração é mandado diretamente para a fabricação do etanol, o objeto de estudo neste trabalho não contempla a produção de açúcar. Não obstante, cabe diferenciar os dois tipos de destilarias de etanol:

- a) Destilarias anexas: ainda maioria no Brasil, produzem álcool também a partir do produto da fermentação do melaço, subproduto da produção de açúcar, o chamado mosto de melaço;
- b) Destilarias autônomas: fabrica somente etanol nas quais o etanol é obtido a partir da fermentação direta do caldo de cana.

O caldo, enriquecido com alguns nutrientes, é inoculado, de acordo com (Ometto, 2005), com leveduras (fungo) do gênero *Saccharomyces*. Tais microorganismos irão reverter a sacarose ( $C_6H_{12}O_6$ ) e transformá-la em etanol ( $C_2H_5OH$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). O produto da fermentação é um substrato açucarado, denominado vinho, que é centrifugado para a obtenção e a reutilização das leveduras, enquanto o líquido é enviado às colunas de destilação.

O vapor é gerado a partir da queima do bagaço nas caldeiras, como mostra a figura 10, e a energia elétrica, pela utilização de geradores a vapor, como mostrado na figura 11.



Figura 10. Caldeira de combustão do bagaço; fonte: Alcarde (2007)



Figura 11. Co-geração de energia elétrica. Fonte: Alcarde (2007).

Foto: Patrícia Cândida Lopes

A reutilização de subprodutos (reciclagem) no ciclo de vida do etanol é caracterizada pela fertirrigação da vinhaça e torta de filtro nos campos de cultivo. A vinhaça é resultante da produção do etanol, após a fermentação do mosto e a destilação do vinho. Segundo Rosseto e Santiago (2007), este é o maior poluidor dentre os efluentes, variando seu desprendimento, dependendo da concentração (teor) alcoólica obtida na fermentação, de 10 a 18 litros de vinhaça por litro de álcool produzido, com altas temperaturas na saída dos destiladores, as quais variam de 85°C a 90°C.

Quanto à composição, a vinhaça apresenta características específicas, tendo sido bem estudadas por vários autores, e as quais variam conforme alguns fatores, segundo Boddey et al. (2008), fatores tais como: natureza e composição da matéria-prima, do mosto, do vinho, do tipo de aparelho destilatório e da condução da destilação.

Contudo, a riqueza organo-mineral é alta em todos os tipos, tendo grande importância na aplicação em solos agrícolas. Portanto, sua utilização nas lavouras de cana-de-açúcar, em substituição parcial ou total à adubação organo-mineral, tem sido largamente ampliada. Rosseto e Santiago (2007) afirmam que a sua aplicação não pode ser excessiva, sob pena de comprometer o meio ambiente, com a salinização do solo e poluição dos aquíferos, e a própria rentabilidade agrícola e industrial.

O transporte da vinhaça pode ser feito por caminhões, canais ou bombas, realizando-se a aplicação, geralmente, por aspersão, como mostra a figura 12.



Figura 12. Fertirrigação de vinhaça por aspersão.

Fonte: Rossetto e Santiago (2007). Foto: Raffaella Rossetto.

Segue a armazenagem do etanol em tanques de concreto logo que distribuição é realizada por meio de caminhões a diesel. O uso do etanol hidratado ocorre pela sua combustão em veículos automotores. O ciclo fecha-se com a absorção, pela cana-de-açúcar, durante seu crescimento, do  $\text{CO}_2$  emitido na combustão e demais fases do ciclo de vida do álcool.

A figura 13 apresenta todas as fases do ciclo de vida do etanol, desde as etapas de produção da cana-de-açúcar, até o transporte a usina, a produção industrial, a fertirrigação, a distribuição do produto e o consumo.



Figura 13. Ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar. Fonte: elaboração própria

### 3.3 Avaliação do ciclo de vida do Etanol da cana-de-açúcar

O presente estudo de ACV tem como objetivo a elaboração de um programa que avalie o ciclo de vida do etanol frente aos principais impactos ambientais de cada atividade da cadeia de produção; quantificando os insumos, calculando seu aporte energético e as emissões do ciclo. Com a finalidade de que possam ser comparados com as regulações ambientais, legais e de mercado que atuam como condicionantes para uma futura certificação ambiental do etanol.

A seguir, listam-se os elementos que compõem o escopo da ACV do etanol:

- **Função do sistema:** o objeto deste estudo de ACV é o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar brasileira numa usina autônoma. A função do etanol é ser utilizado como combustível em veículos automotores para transporte.
- **Unidade e Fluxo de referência:** o fluxo de referência relacionado à unidade funcional e utilizado para obtenção dos dados do ICV é de 1 hectare cultivado com cana-de-açúcar por um período de 1 ano.
- **Sistema de produto:** as unidades de processo que compõem a cadeia de etanol são as seguintes etapas:

- Etapa 1: Plantio da cana
- Etapa 2: Manejo da Cultura
- Etapa 3: Colheita
- Etapa 4: Usina
- Etapa 5: Distribuição

O sistema de produto, mostrado na figura 14, inclui, além das 5 unidades de processo a ser avaliadas, os itens de entrada para cada uma dessas etapas.

- Fronteiras do sistema: as fronteiras são definidas pelas etapas que serão incluídas no estudo, as quais são mostradas na figura 14, incluindo o processamento e fabricação dos itens de entrada e o reuso e tratamento dos resíduos, dependendo da disponibilidade de dados e recursos.
- Requisito dos dados: este trabalho originou-se de uma proposta conjunta com a DIMCI/INMETRO para o desenvolvimento de uma metodologia para a certificação ambiental do etanol brasileiro. A pesquisa envolveu também a colaboração com um grupo de pesquisadores do Departamento de Agrobiologia da EMBRAPA, especialistas com alto grau de experiência e conhecimento comprovado dos setores avaliados, desta fonte, obteve-se a maioria das informações no decorrer de várias entrevistas durante a dissertação; Outros dados foram coletados mediante a revisão bibliográfica.

As considerações específicas, realizadas para cada atividade do ciclo de vida do etanol, estão descritas a seguir:

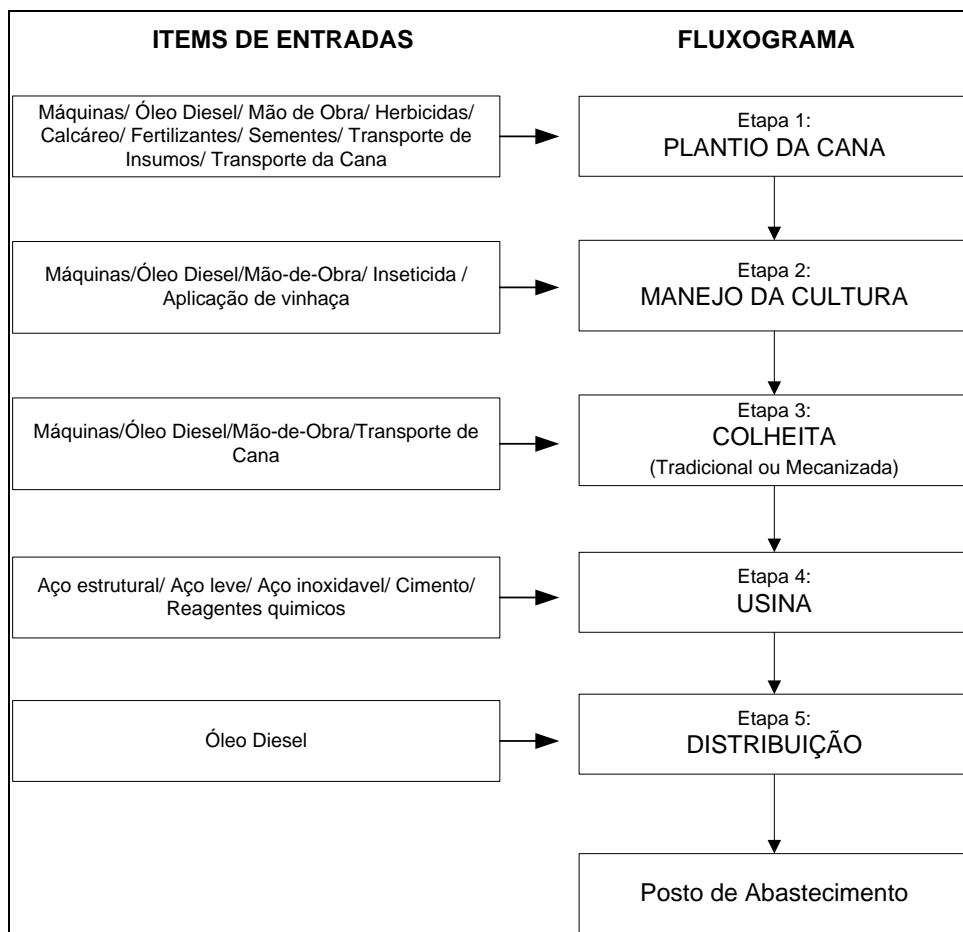


Figura 14. Sistema de produto do etanol. Fonte: elaboração própria.

### 3.4 Inventário do Ciclo de Vida do Etanol da cana-de-açúcar

Para complementar a análise de ciclo de vida, foi realizado um estudo do consumo de recursos naturais, demanda energética e das emissões associadas à cadeia produtiva, que corresponde à etapa de inventário da metodologia de ACV, o inventário é importante para o estudo dos impactos ambientais além de incluir também todos os processos necessários para apoiar a produção e transporte das matérias-primas utilizadas pela cadeia.

Todos os biocombustíveis requerem algum combustível fóssil na sua produção e distribuição. Começando com as operações agrícolas, entrada de óleo diesel para a lavoura, o transporte de sementes, colheita, processamento na usina e distribuição. Na continuação do texto será feita a análise de todos os itens de entrada de cada uma das etapas do ciclo de produção de etanol mostrados na figura 14.



Em busca de um melhor tratamento de dados e facilidade para sua análise, se desenvolveu uma planilha segundo as especificações publicadas no Manual de Boas Práticas e Manejo de Incertezas em Inventários Nacionais de GEE. IPCC (2006a), para elaborar um inventário detalhado.

O quadro 2 mostra o cálculo e apresentação da planilha que foi elaborada numa folha de cálculo do programa informático comercial MSExcel. As colunas do quadro 2 estão rotuladas para um melhor entendimento da A até a letra R, a planilha foi dividida em três partes contendo a seguinte informação:

- a) Primeira parte: Entradas, esta composta por três colunas:
  - Letra A: Mostra as entradas a serem avaliadas em cada uma das etapas.
  - Letra B: Indica a quantidade da cada uma das entradas.
  - Letra C: É a unidade no sistema internacional das quantidades utilizadas da cada uma das entradas por hectare por ano.
- b) Segunda parte: Energia, esta composta por duas colunas:
  - Letra D: Mostra o fator energético (em megaJoules) utilizado para cada entrada pela unidade básica das entradas.
  - Letra E: Indica a energia total (em megaJoules) produzida por cada item por hectare por ano.
- c) Terceira Parte: Emissões, os gases de efeito estufa estudados são dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de nitrogênio (N<sub>2</sub>O). O CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O têm potencial de aquecimento global 23 e 296 vezes maior que o do CO<sub>2</sub>, respectivamente. Assumindo um GWP<sup>22</sup> de 100 anos, segundo o reporte do IPCC (2007), as emissões são agregadas na base da equivalência de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub> eq.). Esta parte da planilha esta composta por onze colunas:
  - Letra F: Indica o combustível de maior representabilidade para cada um dos itens, sendo "C", carvão, "O", óleo cru e "P", petróleo.
  - Letra G: Indica quantos quilogramas de metano são emitidos por megaJoule utilizado.
  - Letra H: Indica as emissões de metano (em quilogramas por cada hectare cultivado por ano).
  - Letra I: mostra os quilogramas emitidos de metano pelas respectivas unidades básicas dos itens.

---

<sup>22</sup> Global Warming Potential

- Letra J: Indica quantos quilogramas de oxido nitroso são emitidos por megaJoule utilizado.
- Letra K: Indica as emissões de oxido nitroso (em quilogramas) por cada hectare cultivado por ano.
- Letra L: Mostra os quilogramas emitidos de oxido nitroso pelas respectivas unidades básicas dos itens.
- Letra M: Indica quantos quilogramas de dióxido de carbono são emitidos por megaJoule utilizado.
- Letra N: Indica as emissões de dióxido de carbono (em quilogramas) por cada hectare cultivado por ano.
- Letra O: Mostra os quilogramas emitidos de dióxido de carbono pelas respectivas unidades básicas dos itens.
- Letra P: Mostra os quilogramas de CO<sub>2</sub> equivalentes emitidos em sua totalidade por cada item por hectare e por ano.
- Letra Q: Mostra o valor do GWP do CH<sub>4</sub>.
- Letra R: Mostra o valor do GWP do N<sub>2</sub>O.

Quadro 2. Cálculo e apresentação da planilha. Fonte: Elaboração Própria.

| ENTRADAS                                |                 |                   | ENERGIA                      |           | EMISSÕES        |                 |   |  |                         |  |  |                         |   |  |                                |
|---|-----------------|-------------------|------------------------------|-----------|-----------------|-----------------|---|--|-------------------------|--|--|-------------------------|---|--|--------------------------------|
| A                                       | B               | C                 | D                            | E         | F               | G               | H                                       | I  | J                       | K  | L  | M                       | N                                       | O  | P                              |
| ITEM                                    | Quant. Bas.     | Unid. Bas./ha.ano | Fator Energ. (MJ/Unid. Bas.) | MJ/ha.ano | Font. Equiv.    | Kg. CH4/MJ      | Emissão de CH <sub>4</sub> (Kg./ha.ano) | Fator de Emissão (Kg. CH <sub>4</sub> /Unid. Bas.) | Kg. N <sub>2</sub> O/MJ | Emissão de N <sub>2</sub> O (Kg./ha.ano) | Fator de Emissão (Kg. N <sub>2</sub> O/Unid. Bas.) | Kg. CO <sub>2</sub> /MJ | Emissão de CO <sub>2</sub> (Kg./ha.ano) | Fator de Emissão (Kg. CO <sub>2</sub> /Unid. Bas.) | Kg. CO <sub>2</sub> Eq./ha.ano |
| <b>Etapa do Ciclo de Vida do Etanol</b> |                 |                   |                              |           |                 |                 |   |  |                         |  |  |                         |   |  |                                |
| Dado de entrada                         | Dado de entrada | Dado de entrada   | Dado de entrada              | B * D     | Dado de Entrada | Dado de Entrada | E * G                                   | H ÷ B  | Dado de Entrada         | E * J                                    | K ÷ B  | Dado de Entrada         | E * M                                   | N ÷ B  | (H * Q) + (K * R) + P          |
| p. ex. Óleo Diesel                      |                 |                   |                              |           |                 |                 |   |  |                         |  |  |                         |   |  |                                |
| Etc...                                  |                 |                   |                              |           |                 |                 |   |  |                         |  |  |                         |   |  |                                |
| Subtotal                                |                 |                   |                              | ΣE        |                 |                 | ΣH                                      |  |                         | ΣK                                       |  |                         | ΣN                                      |  | ΣP                             |
| <b>Total</b>                            |                 |                   |                              |           |                 |                 |   |  |                         |  |  |                         |   |  | ΣP (todas as etapas)           |

Quadro 2 (Continuação). Cálculo e apresentação da planilha.

| Q                   | R                    |
|---------------------|----------------------|
| GWP CH <sub>4</sub> | GWP N <sub>2</sub> O |
| Dado de Entrada     | Dado de Entrada      |

### 3.4.1

#### Energia fóssil empregada na produção de etanol

Na seção de apêndices e anexos ao final do documento está exposta a informação utilizada para a análise da produção do etanol dos seguintes itens de entrada ao sistema: energia na fabricação e manutenção do maquinário, o consumo de óleo diesel, mão-de-obra e transporte da cana.

Macedo et al. (2004) realizaram um levantamento de dados numa usina típica e conseguiram encontrar uma densidade média de utilização (Tabela 4) para todos os equipamentos usados na fase agrícola da produção de cana de açúcar.

Tabela 4. Utilização de equipamentos agrícolas. Fonte: Macedo et al. (2004)

| Equipamento | Densidade média de utilização (kg/ha.ano) |
|-------------|---|
| Tratores    | 41,8                                      |
| Implementos | 12,4                                      |
| Caminhões   | 82,4                                      |
| Total       | 136,6                                     |

Para encontrar o consumo de óleo diesel nas atividades agrícolas da produção de etanol é necessário calcular uma média de consumo anual de combustível. Deve-se levar em conta que um ciclo completo de cana dura seis anos, donde se realiza uma reforma, quatro culturas e cinco cortes, sendo 40% pelo regime de colheita mecânica e os 60% restantes com colheita manual (Mapa, 2010).

O cálculo da média de consumo anual de combustível ( $Mca$ ) está descrito a continuação:  $Mca = Cp + 4 * Cc + 0,4 * (Ccm) + 0,6 * (Cct)$

Onde:

$Mca$ : Média de consumo anual de combustível

$Cp$ : Consumo de óleo diesel na etapa de plantio da cana

$Cc$ : Consumo de óleo diesel na etapa de manejo da cultura

$Ccm$ : Consumo de óleo diesel quando a colheita é mecanizada

$Cct$ : Consumo de óleo diesel quando a colheita é manual

Tabela 5: Dados para o cálculo da média de consumo anual de combustível.

Fonte: elaboração própria baseado nos dados de Macedo et al. (2004).

| Consumo de Óleo   | Quantidade (l/ha.ano) | Fonte   |
|---|-----------------------|---------|
| Consumo de óleo diesel na etapa de plantio da cana. ( <i>Cp</i> )     | 104,9                 | Anexo 2 |
| Consumo de óleo diesel na etapa de manejo de cultura. ( <i>Cc</i> )   | 8,6                   | Anexo 2 |
| Consumo de óleo diesel quando a colheita é mecanizada. ( <i>Ccm</i> ) | 74                    | Anexo 2 |
| Consumo de óleo diesel quando a colheita é manual. ( <i>Cct</i> )     | 12,7                  | Anexo 2 |

Substituindo os valores da tabela 5 na fórmula exposta no parágrafo anterior, resulta uma média de consumo anual de combustível de 29,4 l/ha.ano.

Na sequência se descreve a análise de cada uma das etapas de produção do etanol, quantificando o consumo de energia fóssil para cada atividade.

### 3.4.1.1

#### **Etapa 1: Plantio da cana**

Os equipamentos utilizados para o plantio manual são os tratores com sulcadores, maquinário para a gradagem e aplicadores de agrotóxicos. Na tabela 6 é mostrada uma lista dos equipamentos e implementos necessários para cada uma das operações agrícolas na etapa do plantio da cana.

Tabela 6. Equipamentos e implementos no plantio da cana.

Fonte: Macedo et al. (2004)

| N  | Operações agrícolas                           | Equipamentos | Pot. cv | Implementos                       | Consumo (l diesel/h) | Capacidade de trabalho (ha/h) | Consumo específico (l/ha) |
|--|---|--------------|---------|-----------------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Operações para preparo de solo e plantio |   |              |         |                                   |                      |                               |                           |
| 1  | Aplicação de calcário                         | MF 290       | 78      | Carreta distribuidora de calcário | 6                    | 1,78                          | 3,37                      |
| 2  | Eliminação mecânica de soqueira               | Valmet 1580  | 143     | Eliminador mecânico de soqueira   | 12,8                 | 1,85                          | 6,92                      |
| 3  | Eliminação química de soqueira                | MF 275       | 69      | Bomba de herbicida                | 4                    | 2,5                           | 1,6                       |
| 4  | Gradagem pesada I                             | CAT D-6      | 165     | Grade pesada 18 D x 34"           | 27,6                 | 1,98                          | 13,94                     |
| 5  | Subsolagem                                    | CAT D-6      | 165     | Subsolador de 5 hastes            | 26                   | 1,16                          | 22,41                     |
| 6  | Gradagem pesada II                            | CAT D-6      | 165     | Grade pesada 18 D x 34"           | 27,6                 | 2,04                          | 13,53                     |
| 7  | Gradagem pesada III                           | CAT D-6      | 165     | Grade pesada 18 D x 34"           | 27,6                 | 2,04                          | 13,53                     |
| 8  | Gradagem de acabamento                        | Valmet 1780  | 165     | Grade leve 48 D x 20"             | 15                   | 1,6                           | 9,38                      |
| 9  | Sulcação e adubação                           | MF 680       | 170     | Sulcador adubador duplo           | 11,5                 | 1,26                          | 9,13                      |
| 10                                       | Distribuição de mudas                         | MF 275       | 69      | Carreta para plantio              | 3,3                  | 0,79                          | 4,18                      |
| 11                                       | Fechamento do sulco e aplicação de inseticida | MF 275       | 69      | Cobridor de cana de 2 linhas      | 4,8                  | 2,52                          | 1,9                       |
| 12                                       | Cultivo químico (aplicação de herbicidas)     | MF 275       | 69      | Bomba de Herbicida                | 4                    | 3,3                           | 1,21                      |
| 13                                       | Cultivo mecânico (cultivo quebra do meio)     | MF 292       | 104     | Cultivador para quebra do meio    | 5,5                  | 1,44                          | 3,82                      |

Os equipamentos com seus respectivos implementos que são empregados nas operações agrícolas da etapa de plantio mostrados na tabela 6, correspondem a 29% do maquinário total utilizado no processo agrícola da produção de etanol, (O 71% restante é utilizado nas operações agrícolas das etapas de manejo da cultura e da colheita), o Anexo 2 mostra a lista completa dos equipamentos e implementos utilizados nas operações agrícolas da produção de etanol de cana-de-açúcar.

A quantidade básica considerada para a maquinaria empregada no plantio foi de 39,6 kg de maquinaria/ha.ano que ao ser multiplicada pelo fator energético de 8,52 MJ/kg, cujo cálculo é descrito no Apêndice 1, resulta um aporte de 337,5 MJ/ha.ao, (Tabela 7).

Tabela 7: Consumo de energia fóssil na etapa de plantio da cana.

Fonte: elaboração própria baseado nos dados de Boddey et al. (2008) e Macedo et al. (2004).

| ENTRADAS           |             |                   | ENERGIA                    |           |
|--------------------|-------------|-------------------|----------------------------|-----------|
| ITEM               | Quant. Bas. | Unid. Bas./ha.ano | Fator Energ. MJ/Unid. Bas. | MJ/ha.ano |
| PLANTIO DA CANA    |             |                   |                            |           |
| Máquinas           | 39,6        | kg                | 8,5                        | 337,5     |
| Óleo Diesel        | 0,0153      | m <sup>3</sup>    | 35.520                     | 543,8     |
| Mão-de-Obra        | 25,6        | h                 | 7,8                        | 200,7     |
| Herbicidas         | 3,2         | kg                | 451,7                      | 1.445,3   |
| Calcário           | 367         | kg                | 1,3                        | 480,8     |
| Nitrogênio         | 56,7        | kg                | 54                         | 3.061,8   |
| Fósforo            | 16          | kg                | 3,19                       | 51,0      |
| Potássio           | 83          | kg                | 5,9                        | 488,9     |
| Sementes           | 2.000       | kg                |                            | 181,4     |
| Transp. de Insumos | 0,005       | m <sup>3</sup>    | 35.520                     | 177,6     |
| Subtotal           |             |                   |                            | 6.969,9   |

O consumo total de óleo na etapa de plantio ( $C_p$ ) foi considerado como 104,9 l/hectare (Tabela 5) que representa o 52% do óleo diesel consumido em todo o processo, que ao ser multiplicado pelo valor da  $Mca$ , resulta na quantidade de 15,3 litros de óleo diesel consumidos num hectare por um ano nas tarefas realizadas pelo maquinário na etapa de plantio. O poder calorífico do óleo diesel empregado foi de 35,5 MJ/litro – este cálculo se encontra no Apêndice 1 - e finalmente se encontrou o consumo energético de 543,8 MJ/ha.ano. (Tabela 7).

Pimentel e Patzek (2007), estimaram que em todo o processo agrícola da produção da cana se empregam 128 homem-hora por hectare num ano. Na etapa de plantio o trabalho humano não representa um gasto maior devido a maioria das tarefas empregarem os equipamentos e implementos mecânicos, como mostra a tabela 7. Boddey et al. (2008), consideraram que na etapa de plantio se empregam 25,6 homem-hora por hectare num ano, correspondendo a 20% do total da mão-de-obra utilizada em todos os trabalhos agrícolas. com um fator energético correspondente de 7,84 MJ/hora cujo cálculo é descrito no Apêndice 2, o gasto energético correspondente à mão-de-obra foi contabilizado como 200,7 MJ/ha.ano.

Segundo Menten et al. (2010), em 2009 foram comercializadas 725.000 Mg de produtos formulados (herbicidas, inseticidas, fungicidas, acaricidas e outros),

com 59% correspondendo a herbicidas (429.693 Mg.). Os autores também indicam que a quantidade de herbicidas destinada para a cultura de cana no ano 2009 foi de 8% (34.375,4 Mg). Boddey et al. (2008) indicam que os herbicidas são aplicados numa média de 3,2 kg/ ha.ano nas áreas de cultivo da cana. O herbicida Glifosato é citado como tendo um custo energético de 451,66 MJ/kg. Desta forma, a energia fóssil para herbicidas foi de 1.445,43 MJ/ha. (Tabela 7).

A aplicação de calcário é importante no plantio da cana porque aumenta a exploração da água e dos nutrientes do solo, auxiliando a planta na tolerância à seca. (Macedo, 1998) estima que em cada replantio da cana (a cada 6 anos) a média de 2 Mg/ha (367 kg/ha.ano) de calcário é aplicada com um custo energético de 1,31 MJ/kg, e se estima um custo de energia fóssil de 480,8 MJ/ha. (Tabela 7).

Boddey et al. (2008) estimaram que a aplicação de Nitrogênio fertilizante é de 56,7 kg N/ha.ano. Laegreid et al. (1999) consideraram o fator energético de 54 MJ/kg para Nitrogênio na produção de uréia, com um custo total de 3.061,8 MJ/ha.ano. Os mesmos autores apresentam os valores de 3,19 e 5,89 MJ/kg como fatores energéticos da aplicação de Fósforo e Potássio, respectivamente. Boddey et al. (2008) calcularam também a aplicação média anual de 16 e 83 kg/ha para Fósforo e Potássio, respectivamente, resultando um custo energético de 51 e 488,9 MJ/ha.ano para estes dois fertilizantes. (Tabela 7). A energia consumida pela aplicação das sementes foi calculada segundo a metodologia proposta por Pimentel e Patzek (2007) que outorgam o 2,6% de todos os inputs agrícolas como a energia consumida na aplicação das sementes, no presente estudo esse valor foi de 181,4 MJ/ha.ano.

Por último deve-se calcular o gasto energético empregado no transporte de insumos para o campo e para as usinas, partindo dos fornecedores, de onde se transportam os principais materiais, o calcário e os fertilizantes. A grande maioria das usinas está localizada na região Sudeste (Tabela 3), predominantemente em São Paulo. Os fertilizantes chegam das fábricas que estão localizadas perto da costa ou são importados. O principal porto do estado de São Paulo, Santos, está localizado a 410 km por rodovia da maior área de produção de cana de açúcar do estado, Ribeirão Preto. Na maioria dos casos, o transporte percorrerá uma distancia de 500 km.

Somando as quantidades básicas dos fertilizantes, calcário e herbicidas resulta a quantia de 469,4 kg, tendo em conta outros insumos (reagentes,



pesticidas e lubrificantes) assume-se a quantidade de 700 kg de insumos a serem transportados em caminhões de capacidade de 35 Mg, cujo consumo é de 2 km/litro percorrendo uma distância de 500 km, o que resulta numa entrada de óleo diesel de 5 litros, ou o consumo de 177,6 MJ/ha.ano.

### 3.4.1.2

#### Etapa 2: Manejo da Cultura

As operações agrícolas, os equipamentos e implementos empregados na etapa de manejo da cultura são descritos na tabela 8. A densidade média de utilização mostrada na tabela 4, também é necessária para o cálculo do maquinário empregado nesta etapa.

Tabela 8. Equipamentos e implementos no manejo da cultura.

Fonte: Macedo et al. (2004)

| N                               | Operações agrícolas                    | Equipamentos | Pot. Cv | Implementos                  | Consumo (l diesel/h) | Capacidade de trabalho (ha/h) | Consumo específico (l/ha) |
|---------------------------------|--|--------------|---------|------------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Operações para tratos culturais |  |              |         |                              |                      |                               |                           |
| 1                               | Aleiramento de palha                   | MF 275       | 69      | Aleirador de palha           | 4                    | 1,5                           | 2,92                      |
| 2                               | Cultivo triplice operação              | Valmet 1580  | 143     | Cultivador triplice operação | 9,2                  | 1,3                           | 4,49                      |
| 3                               | Cultivo químico (aplic. de inseticida) | MF 275       | 69      | Bomba de herbicida           | 4                    | 2,5                           | 1,21                      |

Na etapa de manejo da cultura são empregados os equipamentos e seus respectivos implementos mostrados na tabela 8 correspondendo a 7% de todo o maquinário empregado na etapa de produção agrícola do etanol exposto no Anexo 2. A quantidade básica do maquinário utilizado nesta etapa é 9,6 kg/ha.ano, que ao ser multiplicado pelo fator energético de 8,52 MJ/kg - cujo cálculo é descrito no Apêndice 1 - resulta num gasto de 81,47 MJ/ha.ano. (Tabela 9).

Tabela 9. Consumo de energia fóssil na etapa de manejo da cultura. Fonte: elaboração própria baseado nos dados de Boddey et al. (2008) e Macedo et al.(2004).

| ENTRADAS             |             |                   | ENERGIA                    |           |
|----------------------|-------------|-------------------|----------------------------|-----------|
| ITEM                 | Quant. Bas. | Unid. Bas./ha.ano | Fator Energ. MJ/Unid. Bas. | MJ/ha.ano |
| MANEJO DA CULTURA    |             |                   |                            |           |
| Máquinas             | 9,6         | kg                | 8,5                        | 81,5      |
| Óleo Diesel          | 0,0012      | m <sup>3</sup>    | 35520                      | 41,8      |
| Mão-de-Obra          | 25,6        | h                 | 7,8                        | 200,7     |
| Inseticidas          | 0,2         | kg                | 363,8                      | 87,3      |
| Aplicação de vinhaça | 180         | m <sup>3</sup>    |                            | 671,1     |
| Subtotal             |             |                   |                            | 1082,4    |

Para poder encontrar o consumo de óleo diesel no manejo da cultura é necessário empregar o valor de 29,44 l/ha.ano correspondente à média de consumo anual (*Mca*). O consumo total de óleo na etapa de plantio (*Cp*) foi estimado em 8,62 l/hectare que equivalem a 4% do óleo diesel consumido em todo o processo e ao ser multiplicado pelo valor da *Mca* resulta a quantidade de 1,18 litros de óleo diesel consumido por hectare por ano nas tarefas realizadas pelo maquinário na etapa da cultura. O poder calorífico do óleo diesel empregado foi de 35,52 MJ/litro - o cálculo se encontra no Apêndice 1- e finalmente encontrou-se o consumo de 41,8 MJ/ha.ano. (Tabela 9).

Na etapa de manejo da cultura o item mão-de-obra não representa um gasto maior devido à maioria das tarefas empregarem equipamentos e implementos mecânicos, como mostra a tabela 8. Das 128 horas homem/ha.ano consideradas por Pimentel e Patzek (2007) para todo o processo agrícola, Boddey et al. (2008) estimaram que na etapa de manejo da cultura são empregados 20% destes (25,6 horas/ha.ano), que ao serem multiplicados pelo fator energético (7,84 MJ/h) - cujo cálculo é mostrado no Apêndice 2 - resultam num consumo energético de 200,7 MJ/ha.ano.

De acordo com SINDAG (2009), na etapa de manejo da cultura em toda a área plantada com a cana de açúcar foi usado 0,2 kg/ha.ano de inseticida. Segundo Pimentel (1980), o custo energético dos inseticidas utilizados na cana de açúcar é 363,83 MJ/kg, resultando num consumo energético de 87,3 MJ/ha.ano.

Soares et al. (2009) informaram que para cada litro de etanol produz-se de 10 a 12 litros de vinhaça. Segundo Resende et al. (2006), aproximadamente 80 m<sup>3</sup> de vinhaça são aplicados por hectare, mas antes da aplicação ela é misturada à água que vem do lavado da cana na usina formando 180 m<sup>3</sup>/ha.ano de vinhaça diluída. Assume-se que para a aplicação da vinhaça se emprega uma bomba diesel de 125 HP com um rendimento de 2h/ha resultando num gasto energético de 671,13 MJ/ha.ano.

### 3.4.1.3

#### **Etapa 3: Colheita**

Segundo o relatório: “Perfil do setor de açúcar e do etanol no Brasil” publicado pelo MAPA (2010) o processo de substituição do corte manual pelas

máquinas está ocorrendo de forma rápida e já representa o 42,8% do total da área na safra 2008-09 na região Centro-Sul (Tabela 10). Nos estados da região Nordeste, onde a oferta de mão-de-obra é maior e encontram-se áreas com declives acentuados, essa transformação está apenas começando.

Tabela 10. Participação da colheita mecânica e manual no total da área colhida na safra 2008-09. Fonte: elaboração própria baseado em dados de MAPA (2010).

| Região         | Sistema de colheita por área    |                         |                                   |                                    |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|                | Participação da colheita manual | Área de colheita manual | Participação da colheita mecânica | Área estimada da colheita mecânica |
|                | %                               | hectares                | %                                 | hectares                           |
| Centro-Sul     | 57,2                            | 3.423.050               | 42,8                              | 2564.050                           |
| Norte-Nordeste | 94,7                            | 1.014.660               | 5,3                               | 57.011                             |
| Brasil         | 62,9                            | 4.437.710               | 37,1                              | 2.621.061                          |

Considerando que aproximadamente 90% da produção do etanol provém do Centro-Sul, a seguinte situação foi assumida para o Brasil: 60% da área total é colhida manualmente e a colheita mecânica é feita nos 40% restantes.

Os equipamentos e implementos necessários para a colheita são mostrados na tabela 11.

O valor da densidade média de utilização de equipamentos e implementos mostrada na tabela 4 também é essencial para o cálculo do maquinário empregado nesta etapa, contemplando que dos equipamentos mostrados na Tabela 11, o equipamento Case A-7700 é utilizado quando a colheita é mecanizada e o equipamento MF 290 RA é empregado na colheita manual.

Na etapa da colheita são utilizados 87,4 kg/ha.ano de maquinário, que ao serem multiplicados pelo fator energético resultam num custo energético de 744,85 MJ/ha.ano. (Tabela 12).

Tabela 11. Equipamentos e Implementos empregados na colheita.

Fonte: Macedo et al. (2004)

| Equipamentos                      | Pot. Cv | Implementos                   | Consumo (l diesel/h) | Capacidade de trabalho (t/h) | Consumo específico (l/ha) |
|-----------------------------------|---------|-------------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|
| Operações para a colheita da cana |         |                               |                      |                              |                           |
| Case A-7700                       | 330     | Colhedora de cana combinada   | 40,4                 | 45                           | 74                        |
| MF 290 RA                         | 78      | Carregadora de cana           | 7,1                  | 46                           | 12,7                      |
| Valtra BH 180                     | 180     | Reboque de julieta/transbordo | 9                    | 35                           | 21,2                      |

Tabela 12. Consumo de energia fóssil na etapa da colheita. Fonte: elaboração própria baseado em dados de Boddey et al. (2008) e Macedo et al. (2004).

| ENTRADAS           |             |                   | ENERGIA                    |           |
|--------------------|-------------|-------------------|----------------------------|-----------|
| ITEM               | Quant. Bas. | Unid. Bas./ha.ano | Fator Energ. MJ/Unid. Bas. | MJ/ha.ano |
| COLHEITA           |             |                   |                            |           |
| Máquinas           | 87,4        | kg                | 8,5                        | 744,9     |
| Óleo Diesel        | 0,0127      | m <sup>3</sup>    | 35.520                     | 449,7     |
| Mão-de-Obra        | 53,5        | h                 | 7,8                        | 419,3     |
| Transporte da Cana | 0,0486      | m <sup>3</sup>    | 35.520                     | 1.725,6   |
| Subtotal           |             |                   |                            | 3.339,4   |

Para encontrar o consumo de óleo diesel na colheita é necessário empregar o valor de 29,44 l/ha.ano correspondente à média de consumo anual ( $Mca$ ). O consumo total de óleo na etapa da colheita corresponde à soma do consumo específico dos equipamentos empregados na colheita mecanizada ( $Ccm$ ), estimado em 74 l/ha.ano e o consumo específico do equipamento empregado na colheita manual ( $Cct$ ), estimado em 12,7 l/ha.ano, levando em conta que a área colhida manualmente é de 60%.

O consumo do óleo diesel na colheita é o 43% do óleo diesel consumido em todo o processo que ao ser multiplicado pelo valor da  $Mca$  resulta a quantidade de 12,7 litros de óleo diesel consumidos por hectare por ano nas tarefas realizadas pelo maquinário na etapa da colheita. O poder calorífico do óleo diesel empregado foi de 35,52 MJ/litro, como demonstrado no Apêndice 1, e finalmente se encontrou o consumo de 449,65 MJ/ha.ano. (Tabela 12).

O quesito mão-de-obra na colheita representa o trabalho de cortar a cana depois de ser queimada. Boddey et al. (2008) afirmaram que a tarefa básica de um homem ao cortar a cana é de 6000 kg/dia, então assume-se que um dia de trabalho equivale a 8 homem-hora. Segundo o IBGE (2010a), a produtividade da cana para a safra 2009-2010 foi de 80,23 Mg/ha. Deve-se levar em conta que o corte da cana só é aplicado na colheita manual (60% da colheita). Finalmente, destes números

resultam 53,5 horas homem/ha.ano, que ao ser multiplicados pelo fator energético (7,84 MJ/h) - cujo cálculo é mostrado no Apêndice 2 - resulta num consumo energético de 419,3 MJ/ha.ano.

O custo da energia fóssil do transporte da cana do campo até a usina depende da distância média percorrida no trajeto dos caminhões até a usina, da capacidade de transporte e do consumo de óleo diesel por km. No relatório “Perfil do setor de açúcar e do etanol no Brasil” de MAPA (2010), se estima que a distância média percorrida pela cana do ponto de corte até a usina, é aproximadamente 23,4 quilômetros, o caminhão mais utilizado é o do tipo “Romeo e Julieta”. Este tipo de caminhão pode transportar entre 26 e 30 Mg de cana segundo Macedo et al. (2004) e consome 1,6 km/litro de óleo diesel estando carregado e 3km/litro estando descarregado.

Para o presente estudo se empregou a média de 28 Mg/caminhão, o rendimento de um hectare de cana segundo a publicação “Confronto das safras 2009-2010” de IBGE (2010a) foi de 80,23 Mg/ha para a safra 2009-2010, logo um hectare de cana precisa de 2,865 cargas, sendo a distância de ida e volta de 46,8 km com uma média de consumo de 2,3 km/litro, o consumo total de óleo diesel será de 58,3 litros. Lembremos que a cada 6 anos tem-se 5 cortes, logo o consumo anual de diesel por hectare será de 45,67 litros , levando em conta o poder calorífico do óleo diesel de 35,52 MJ/litro (Cálculo no Apêndice 1) o consumo médio de energia fóssil para o transporte de cana será de 1.725,6 MJ/ha.ano.

#### **3.4.1.4 Etapa 4: Usina**

Uma grande quantidade de energia é utilizada no processamento do etanol na usina, para bombeamento de água, moagem da cana, fermentação e a destilação de etanol. Pimentel e Patzek (2007) estimaram que são necessários 2,55 Gcal por 1000 l de etanol anidro (16,9 GJ/ha.ano) devido à produção de vapor para o aquecimento direto e geradores elétricos. No entanto todas as usinas brasileiras se valem de seu bagaço para gerar esta energia. A queima do bagaço (co-geração de energia) gera vapor, que alimenta caldeiras de alta pressão, e assim a usina se abastece de energia. Macedo et al. (2004), estima que na maioria de usinas exista

um excedente de energia derivada do bagaço de entre 8 e 15% que pode ser exportada para a rede, ou o excedente de bagaço é transportado a fábricas próximas para a geração de energia. Deste modo o uso do bagaço em todas as usinas significa que não é necessário o uso de energia fóssil para alimentar a usina.

Pensar que manter a usina funcionando não consome energia adicional é certo, porém, ainda assim temos um custo energético fundamental, o custo da construção da usina. Boddey et al. (2008) segue o mesmo procedimento (Anexo 3) desenvolvido por Pimentel e Patzek (2007) para calcular a quantidade de energia contida para construir, manter e renovar uma usina que corresponda hoje a média Brasileira.

Macedo et al. (2004) estimaram que a construção de uma usina tem 50 anos de vida útil e um custo de manutenção do 4% por ano. O reporte de Hendriks (2004) indica um valor de 6,2 MJ de energia requerida para produzir 1 kg de cimento. Considera-se que a massa total do cimento utilizado para a construção de uma usina é de 1600 kg (Boddey et al., 2008). Calculando a energia investida na construção e manutenção do prédio da usina ( $1,6 + (0,04 \times 50 \times 1,6)$ ) e acrescentando a energia consumida *in-situ*, temos um gasto de 71,1 MJ/ha.ano.

Para calcular o gasto energético do aço investido na usina, considera-se que a terceira parte da massa total do aço esta disposta como equipamentos e o restante conforma a estrutura da usina. A mesma metodologia exposta no parágrafo anterior foi usada para calcular o gasto energético do aço leve e do aço inoxidável (Ver Anexo 3). Consideram-se 28 kg/ha.ano de aço leve estrutural, resultando num custo energético de 839,7 MJ/ha.ano, 25,1 kg/ha.ano de aço leve para os distintos equipamentos, acrescentando 753 MJ/ha.ano. Para o aço inoxidável, 4,0 kg/ha.ano resultando num custo energético de 286,1 MJ/ha.ano (Tabela 13).

Tabela 13. Consumo de energia fóssil na etapa de produção de etanol na usina.

Fonte: elaboração própria baseado em dados de Boddey et al. (2008).

| ENTRADAS                           |             |                    | ENERGIA                    |           |
|------------------------------------|-------------|--------------------|----------------------------|-----------|
| ITEM                               | Quant. Bas. | Unid. Bas./ ha.ano | Fator Energ. MJ/Unid. Bas. | MJ/ha.ano |
| USINA                              |             |                    |                            |           |
| Aço leve estrutural                | 28          | kg                 | 30                         | 839, 7    |
| Aço leve em equipamentos           | 25,1        | kg                 | 30                         | 753       |
| Aço inoxidável                     | 4           | kg                 | 71,7                       | 286, 1    |
| Cimento                            | 11,5        | kg                 | 6,2                        | 71, 1     |
| Retificação ate 99.5%              |             |                    |                            | 225, 3    |
| Reagentes químicos usados na usina |             |                    |                            | 487, 6    |
| Subtotal                           |             |                    |                            | 2.662, 8  |

A energia necessária para a retificação de etanol hidratado é considerada 225,3 MJ/ha.ano e a energia consumida proveniente dos insumos da usina foi de 487,6 MJ/ha.ano (Boddey et al., 2008).

### 3.4.1.5

#### Etapa 5: Distribuição

Segundo o estudo feito por Carvalho (2010) para atender as distribuidoras do país, tem-se que percorrer aproximadamente  $2,17 \times 10^8$  quilômetros. Dividindo-se este valor pelo consumo médio de diesel considerado no estudo (2,5 km/l), temos o consumo anual de aproximadamente  $8,7 \times 10^7$  litros de diesel. Multiplicando este valor pelo poder calorífico do diesel – 35,52 MJ por litro – chegamos a um valor energético anual de  $4,15 \times 10^9$  MJ.

Tal grandeza, quando dividida pela área de 8.836.504 hectares assumida para o plantio na safra 2009-2010 segundo o relatório “Confronto das safras 2009-2010” publicado pelo IBGE (2010a), nos mostra que ao distribuir o etanol brasileiro, consome-se 349,3 MJ por hectare por ano.

Tabela 14. Consumo de energia fóssil na distribuição do etanol.

Fonte: elaboração própria baseado em dados de Carvalho (2010).

| ENTRADAS     |             |                    | ENERGIA                    |           |
|--------------|-------------|--------------------|----------------------------|-----------|
| ITEM         | Quant. Bas. | Unid. Bas./ ha.ano | Fator Energ. MJ/Unid. Bas. | MJ/ha.ano |
| DISTRIBUIÇÃO |             |                    |                            |           |
| Óleo diesel  | 0,0098      | m <sup>3</sup>     | 35.520                     | 349,3     |
| Subtotal     |             |                    |                            | 349,3     |

### 3.4.2

#### Quantificação das emissões de GEE

Para a produção de etanol, combustíveis fósseis são usados diretamente e indiretamente na construção da maquinaria, dos equipamentos, materiais químicos e processos biológicos que são usados na produção de cana de açúcar. O uso destes combustíveis fósseis gera a emissão dos GEE. As quantidades básicas de todos os itens de entrada expostos anteriormente e a energia consumida por esses itens são usadas para estimar a emissão dos GEE utilizando fatores de emissão para cada um dos GEE considerados (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) (Apêndice 7).

As emissões de GEE para os *inputs* de mão-de-obra, herbicidas, inseticidas e sementes que se originam de diferentes fontes é segundo Boddey et al. (2008) são melhor representados pelo óleo cru como sua fonte de energia primária necessária para sua fabricação, processamento ou desenvolvimento. Segundo o relatório “*Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories*” publicado pelo IPCC (2006a), 1 GJ de óleo cru emite 73,3 kg de CO<sub>2</sub>, 0,003 kg de CH<sub>4</sub> e 0,0006 kg de N<sub>2</sub>O.

As estimativas para maquinaria foram baseadas na quantidade de aço contido em sua composição. A energia que será assumida provém das indústrias de aço que empregam carvão como fonte de energia primária; 1 GJ é equivalente a 94,6 kg de CO<sub>2</sub>, 0,001 kg CH<sub>4</sub> e 0,0015 kg de N<sub>2</sub>O (Ipcc, 2006a).

Óleo diesel é a fonte de energia para o transporte de insumos e cana, para as máquinas agrícolas e para irrigação; cada GJ empregado emite 74,1 kg de CO<sub>2</sub>, 0,003 kg de CH<sub>4</sub> e 0,0006 kg de N<sub>2</sub>O (Ipcc, 2006a).

Utilizou-se a informação do relatório do IPCC (2006a) das emissões segundo a fonte de energia primária que é mais representativa para cada um dos itens expostos nos parágrafos anteriores e as quantidades básicas para encontrar os fatores de emissão para cada item, facilitando os futuros cálculos das emissões.



Os fertilizantes e o calcário completam os componentes na produção da cana-de-açúcar. Na falta de informação relacionada ao tipo de calcário usado nas áreas de cana-de-açúcar, as emissões de CO<sub>2</sub> originadas da adição de calcário foram estimadas pela quantidade de calcário aplicado ao plantio, multiplicada pelo fator de emissão de 0,75 kg de CO<sub>2</sub>/kg de calcário, proposto pelo IPCC (2006a). Para a emissão dos fertilizantes, uréia, superfosfato triplo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e Cloreto de potássio (KCl) são considerados os melhores representantes da adubação NPK usadas nas áreas de plantação de cana-de-açúcar. A contribuição para cada fonte foi estimada por Kongshaug (1998), o autor assume que pela produção de 1 kg de uréia, 1 kg de superfosfato triplo e 1 kg de cloreto de potássio representam 0,61, 0,17 e 0,34 kg de CO<sub>2</sub> emitidos para a atmosfera respectivamente.

Durante o manejo da cultura ocorrem também emissões do N<sub>2</sub>O proveniente do Nitrogênio adicionado à torta de filtro e dos fertilizantes. De acordo com Soares et al. (2009) e o relatório do IPCC (2006a), 1% do Nitrogênio aplicado é emitido como N<sub>2</sub>O resultando em 167,83 kg de CO<sub>2</sub> eq/ha.ano, e 0,2% do Carbono proveniente da aplicação da vinhaça é emitido como CH<sub>4</sub>, resultando em 171,34 kg CO<sub>2</sub> eq/ha.ano.

Na colheita foram levadas em conta as emissões de CH<sub>4</sub> e do N<sub>2</sub>O da queima da cana depositada, usou-se um fator de emissão de 2,7 kg de CH<sub>4</sub>/Mg de cana depositada e para a emissão de N<sub>2</sub>O, Boddey et al. (2008) considerou um fator de emissão de 0,007 kg de N<sub>2</sub>O/Mg de cana depositada. Isto resulta numa emissão de 22,05 kg de CH<sub>4</sub>/ha.ano e de 0,5717 kg de N<sub>2</sub>O/ha.ano. A área colhida após a queima foi considerada como sendo 60% de toda a área colhida. Para os 40% restantes nas áreas sem queima é considerado um fator de emissão de 0,4714 kg N<sub>2</sub>O/ha.ano emitindo 55,81 kg de CO<sub>2</sub> eq./ha.ano devido à mineralização dos resíduos.

As emissões resultantes do transporte da cana do campo até a usina somaram 15,284 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por hectare por ano.

Para as emissões dos materiais para a construção da usina, foram usados os fatores de emissão do relatório do IPCC usados por Boddey et al. (2008), 0,507 kg de CO<sub>2</sub>/kg, 1,6 kg de CO<sub>2</sub> eq/kg e 1,06 kg de CO<sub>2</sub> eq/kg para cimento, aço inoxidável e aço leve, respectivamente, emitindo 5,8; 6,4 e 56,27 kg de CO<sub>2</sub> eq/kg, respectivamente.

Com a finalidade de explicar o impacto da produção de etanol brasileiro de cana de açúcar. A análise foi dividida nas principais etapas de produção. (Apêndice 7: Planilha). As emissões de CO<sub>2</sub> são predominantes no plantio devido ao uso da energia dos combustíveis fósseis nos implementos, no maquinário e no transporte dos implementos. Durante o manejo da cultura a emissão do N<sub>2</sub>O e de CH<sub>4</sub>, derivada da aplicação da vinhaça é a maior e representa o 46% das emissões expressas em CO<sub>2</sub> equivalentes. Na colheita a principal emissão provém dos gases CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O e numa porção mínima pela decomposição de N nas áreas não queimadas. A emissão derivada da infraestrutura das usinas na produção de etanol alcança aproximadamente 3% das emissões calculadas para o ciclo completo.