



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
Faculdade de Engenharia Mecânica

**ALINE BIGATON**

# **Contribuição dos Fertilizantes para o Desempenho Econômico e Ambiental do Etanol de Cana-de-Açúcar**

CAMPINAS  
2017

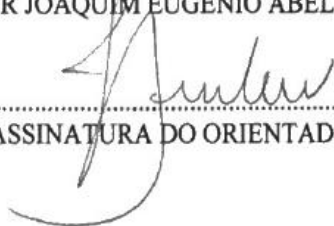
**ALINE BIGATON**

# **Contribuição dos Fertilizantes para o Desempenho Econômico e Ambiental do Etanol de Cana-de-Açúcar**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestra em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA ALINE BIGATON, E ORIENTADA PELO PROF. DR JOAQUIM EUGÊNIO ABEL SEABRA.

  
.....  
ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS  
2017**

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** CAPES, 01-P-4371/2015

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Bigaton, Aline, 1990-  
B48c Contribuição dos fertilizantes para o desempenho econômico e ambiental do etanol de cana-de-açúcar / Aline Bigaton. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Joaquim Eugênio Abel Seabra.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Sustentabilidade. 2. Cana-de-açúcar. 3. Planta - Nutrição. 4. Vinhaça. 5. Torta de filtro. I. Seabra, Joaquim Eugênio Abel, 1981-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Contribution of fertilizers to the economic and environmental performance of sugarcane ethanol

**Palavras-chave em inglês:**

Sustainability

Sugarcane

Plant nutrition

Vinasse

Filter cake

**Área de concentração:** Planejamento de Sistemas Energéticos

**Titulação:** Mestra em Planejamento de Sistemas Energéticos

**Banca examinadora:**

Joaquim Eugênio Abel Seabra [Orientador]

Fernanda Latanze Mendes Rodrigues

Henrique Coutinho Junqueira Franco

**Data de defesa:** 20-04-2017

**Programa de Pós-Graduação:** Planejamento de Sistemas Energéticos

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA  
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO**

**Contribuição dos Fertilizantes para o  
Desempenho Econômico e Ambiental do  
Etanol de Cana-de-Açúcar**

Autor: Aline Bigaton

Orientador: Joaquim Eugênio Abel Seabra

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

**Prof. Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra, Presidente  
UNICAMP / FEM**

**Profa. Dra. Fernanda Latanze Mendes Rodrigues  
PECEGE – ESALQ/USP**

**Prof. Dr. Henrique Coutinho Junqueira Franco  
CTBE**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 20 de abril de 2017.

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais, pelos ensinamentos da vida, incentivo e inspiração de fé, ao meu irmão, pelo grande exemplo de pessoa e determinação, e agradeço ao meu marido, pelo companheirismo e apoio e pelo enorme auxílio em mais esta etapa.

A todos os amigos do PECEGE, por tornarem os dias de trabalho mais estimulantes e pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho, em especial aos amigos André Danelon e Ruan D'Aragone.

À Fernanda Latanze pelo auxílio nos cálculos e desenvolvimento do trabalho e por sua disposição.

Ao Jorge Vargas pela ajuda e ao professor Joaquim pela orientação.

Agradeço também ao pesquisador Roni Guareschi, da EMBRAPA Agrobiologia, pela disponibilização dos dados e atenção e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro.

## **Resumo**

A cana-de-açúcar é a cultura mais promissora no que diz respeito a fontes de energia renováveis, com a produção de etanol e biomassa para cogeração de energia, a qual representa uma alternativa ambiental e econômica para reduzir as emissões de gases do efeito estufa. No entanto, de forma crescente, a agricultura é vista como grande contribuidora para as emissões de gases do efeito estufa, principalmente advindos da utilização de fertilizantes nitrogenados, os quais são de grande importância para que a cultura se desenvolva de maneira produtiva. Neste sentido, este trabalho objetivou analisar os impactos econômicos e ambientais da utilização de fertilizantes para a produção de cana-de-açúcar, visando o produto final do etanol. As análises econômicas foram baseadas no banco de dados do PECEGE, quanto aos custos de produção de uma região produtora de cana a qual tem grande representatividade dos fertilizantes nos custos (Goiatuba), sendo gerados três cenários para comparação de custos: i) produção agrícola considerando apenas fertilizantes minerais; ii) considerando a utilização dos resíduos industriais torta de filtro e vinhaça in natura como fertilizantes orgânicos e complementação com fertilizantes minerais; iii) considerando a utilização dos resíduos industriais torta de filtro e vinhaça concentrada e complementação com fertilizantes minerais. Os mesmos cenários foram considerados para cálculo dos impactos ambientais, sendo que foram calculados a utilização de diesel referentes às operações nos três cenários e as emissões advindas dos fertilizantes nitrogenados, posteriormente os valores foram utilizados em uma análise de ciclo de vida para a região, comparando-se os resultados. Os resultados econômicos apresentaram os valores de custo total para produção de etanol mais competitivos quando há utilização dos fertilizantes orgânicos, especialmente no cenário em que há aplicação de vinhaça concentrada. Quanto aos resultados ambientais, há um aumento da utilização de diesel nos cenários com aplicação de fertilizantes orgânicos, no entanto, a redução nas emissões totais do uso de fertilizantes minerais é compensadora. Dessa forma, a utilização dos resíduos industriais torta de filtro e vinhaça são alternativas viáveis para substituição de fertilizantes minerais, no entanto, maiores estudos sobre as tecnologias disponíveis e as fontes de fertilizante mineral para complementação se fazem necessários.

## **Abstract**

Sugarcane is the most promising crop on renewable energy sources, with the production of ethanol and biomass for energy cogeneration, which represents an environmental and economic alternative to reduce greenhouse gas emissions. Increasingly, however, agriculture is seen as a major contributor to greenhouse gas emissions, mainly from the use of nitrogen fertilizers, which are of great importance for the development of crops in a productive way. In this sense, this work aimed to analyze the economic and environmental impacts of the use of fertilizers for the production of sugarcane, directed to the final product of ethanol. The economic analyzes were based on the PECEGE database, regarding the production costs of a sugarcane producing region, which has a big representativeness of fertilizers in the costs (Goiatuba), generating three scenarios for cost comparison: i) agricultural production considering only mineral fertilizers; ii) considering the use of industrial waste, filter cake and vinasse in natura, as organic fertilizers, and supplementation with mineral fertilizers; iii) considering the use of industrial waste filter cake and concentrated vinasse and supplementation with mineral fertilizers. The same scenarios were considered for calculation of the environmental impacts, and the use of diesel for the operations in the three scenarios and the emissions from the nitrogen fertilizers were calculated, later the values were used in a life cycle analysis for the region, comparing the results. The economic results presented the most cost-competitive values for ethanol production when organic fertilizers are used, especially in the scenario where concentrated vinasse is applied. Regarding the environmental results, there is an increase in the use of diesel in the scenarios with application of organic fertilizers, however, the reduction in total emissions from the use of mineral fertilizers is compensatory. Thus, the use of industrial waste filter cake and vinasse are viable alternatives for replacement of mineral fertilizers, however, further studies on available technologies and sources of mineral fertilizer for supplementation are necessary.

## Lista de Ilustrações

Figura 1.1 - Projeção da oferta de etanol (produção brasileira e importação).....	15
Figura 2.1 - Cadeia produtiva dos fertilizantes.....	35
Figura 2.2 - Participação da Produção Nacional e Importações na oferta de fertilizantes (média 2006-2010). ....	38
Figura 2.3 - Rota de produção de fertilizantes nitrogenados. ....	40
Figura 2.4 - Rota de Produção dos Principais Fertilizantes Fosfatados Produzidos no Brasil. .....	43
Figura 2.5 - Efeito do pH na disponibilidade dos nutrientes. ....	49
Figura 2.6 - Representação da “lei do mínimo” de Liebig. ....	49
Figura 3.1 - Composição dos custos agroindustriais (COE, COT e CT).....	58
Figura 3.2 - Custo de transporte e aplicação de vinhaça concentrada. ....	60
Figura 3.3 - Resumo dos cenários para análise de impactos econômicos. ....	62
Figura 3.4 - Resumo dos cenários para análise de impactos ambientais. ....	67
Figura 4.1 - Distribuição relativa dos fatores de formação dos custos de produção de cana- de-açúcar para fornecedores. ....	70
Figura 4.2 - Representatividade dos custos com fertilizantes no Custo Total para produção de cana-de-açúcar em diferentes painéis, desde a safra 2009/10. ....	71
Figura 4.3 - Endividamento e Receita do Setor Sucroenergético (Centro-Sul) e Câmbio. ....	72
Figura 4.4 - Produção de cana-de-açúcar no Brasil por região. ....	73
Figura 4.5 - Análise de sensibilidade dos custos de aplicação e transporte da vinhaça concentrada. ....	75
Figura 4.6 - Emissões advindas de fertilizantes nitrogenados, por hectare. ....	78

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Extração e exportação de macronutrientes para a produção de 100 t de colmos. .....	29
Tabela 2.2 - Custo de produção agroindustrial de processamento da cana-de-açúcar (R\$/t) por região. ....	32
Tabela 2.3 - Características químicas dos principais fertilizantes nitrogenados comercializados no Brasil.....	40
Tabela 2.4 - Composição química dos principais fertilizantes potássicos comercializados no Brasil.....	42
Tabela 2.5 - Balanço energético para a produção de etanol de cana-de-açúcar sob condições brasileiras.....	46
Tabela 2.6 - Comparação entre os resultados finais de emissões de GEEs no ciclo de vida do etanol brasileiro. ....	47
Tabela 2.7 - Características da vinhaça da cana-de-açúcar. ....	52
Tabela 2.8 - Composição química aproximada de 100 gramas de torta de filtro. ....	56
Tabela 3.1 - Parâmetros da usina da região de Goiatuba utilizada para avaliação dos cenários. .....	62
Tabela 3.2 - Quantidades aplicadas por hectare de fertilizantes nitrogenados. ....	65
Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados no cálculo das emissões de NH <sub>3</sub> -N decorrentes da aplicação da vinhaça em canaviais no Brasil.....	66
Tabela 4.1 - Custos de Produção Agrícola, considerando os Cenários 1, 2 e 3. ....	74
Tabela 4.2 - Custos de Produção do Etanol, considerando os Cenários 1, 2 e 3.....	76
Tabela 4.3 - Consumo de diesel nas operações que envolvem aplicação de fertilizantes nos diferentes cenários considerados (transporte no campo + aplicação). ....	76
Tabela 4.4 - Emissões advindas de fertilizantes nitrogenados, por hectare. ....	77
Tabela 4.5 - Emissões realizadas e evitadas de gases de efeito estufa (CO <sub>2</sub> eq) durante as etapas de produção e distribuição do etanol de cana-de-açúcar para os cenários de análise. ....	80

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

ACV – Análise de ciclo de vida

CNA – Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil

COE - Custo Operacional Efetivo

COT - Custo Operacional Total

CT - Custo Total

CVRD - Companhia Vale do Rio Doce

DAP – Di-amônio fosfato

DBO - Demanda bioquímica de oxigênio

DQO - Demanda química de oxigênio

EPA - U. S. Environmental Protection Agency

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations

GEE - Gases de efeito estufa

IAF - Índice de área foliar

MAP – Mono-amônio fosfato

MO – Matéria Orgânica

NPK – Nitrogênio, fósforo e potássio

PAG - Potencial de aquecimento global

PECEGE - Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas

PROÁLCOOL - Programa Nacional do Alcool

TR - Açúcares Totais Recuperáveis

VN – Vinhaça *in natura*

## Sumário

Introdução .....	13
1.1 Contextualização.....	13
1.2 Objetivo .....	17
1.3 Estrutura da Dissertação .....	18
2 Revisão Bibliográfica.....	19
2.1 Importância da Adubação .....	19
2.1.1 Nitrogênio.....	20
2.1.2 Fósforo.....	22
2.1.3 Potássio.....	23
2.1.4 Cálcio.....	24
2.1.5 Magnésio .....	24
2.1.6 Enxofre .....	25
2.2 Exigências Nutricionais e Balanço de Nutrientes.....	26
2.2.1 Exigências Nutricionais e Balanço de Nutrientes na Cana-de-Açúcar.....	26
2.3 Relação da Produtividade e Custos de Produção.....	30
2.4 Produção e Logística dos Fertilizantes - Nacional e Importados.....	33
2.4.1 Fertilizantes Nitrogenados.....	38
2.4.2 Fertilizantes Potássicos.....	41
2.4.3 Fertilizantes Fosfatados .....	43
2.5 Utilização de Fertilizantes e o Meio Ambiente .....	44
2.6 Eficiência dos Fertilizantes Minerais.....	48
2.6.1 Utilização da Vinhaça como Fertilizante Orgânico.....	51
2.6.2 Utilização da Torta de Filtro como Fertilizante Orgânico.....	55
3 Metodologia .....	57
3.1 Análise dos Custos de Produção .....	57
3.2 Análise dos Impactos Ambientais.....	63
4 Resultados e Discussão .....	70
4.1 Influência dos Fertilizantes nos Custos de Produção da Cana-de-Açúcar.....	70
4.2 Influência dos Fertilizantes no Impacto Ambiental .....	76
5 Conclusões .....	81
Referências Bibliográficas.....	83

ANEXO A – Parte da planilha de coleta de dados de produção de cana-de-açúcar (painel)	
.....	97
ANEXO B – Parte da planilha de coleta de dados de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol (usinas)	
.....	98

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Contextualização**

O Brasil tem tradição no cultivo e processamento de cana-de-açúcar para a produção de açúcar há alguns séculos. No início dessa atividade, o sistema de produção que se consolidou no país, especificamente na região Nordeste, que se baseava na monocultura extensiva, na grande propriedade, na mão de obra escrava e no elevado volume de capital (GARCIA, 2007). O modelo atual ainda mantém a característica de monocultura extensiva e a necessidade de capital, isto é, prevalece a grande escala (GOLDEMBERG E LUCON, 2007; MACEDO, 2007), em função das economias de escala associadas a este modelo produtivo.

Atualmente, o Brasil é o maior produtor de açúcar do planeta, com 36 milhões de toneladas produzidas e 24 milhões de toneladas exportadas na safra 2014/2015 - quantias equivalentes a 20% da produção global e 40% da exportação mundial, respectivamente. No caso do etanol, o país é o segundo maior produtor (ranking liderado pelos Estados Unidos), com um volume de produção na safra 2014/2015 que atingiu 28 bilhões de litros. É também o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma produção de mais de 632 milhões de toneladas por ano e aproximadamente 9 milhões de hectares de área plantada, gerando 1,2 milhão de empregos e um PIB setorial de US\$48 bilhões (UNICA, 2016).

No país, o uso do etanol como combustível foi estimulado pela crise que afetou o setor açucareiro ainda no início do século XX, paralelo à crise de 1929, que abalou a economia capitalista como um todo. O governo brasileiro, a partir do Decreto nº 19.717, de 1931, tornou obrigatória a mistura de etanol à gasolina importada, na proporção mínima de 5% (PAMPLONA, 1984). Essa foi a primeira iniciativa para a consolidação do setor, que posteriormente seria reconhecida como uma alternativa aos efeitos nocivos do uso dos combustíveis fósseis ao meio ambiente.

No entanto, o grande impulso ao setor sucroenergético brasileiro foi dado a partir do lançamento do Proálcool (Programa Nacional do Álcool), em 1975. O programa estimulou não apenas a produção, mas o desenvolvimento tecnológico, com focos diferentes em suas várias fases (LEAL, 2010). É uma das políticas industriais adotada como ferramenta pelo país para a substituição de importações e para estabelecer condições exclusivas para o mercado de etanol hidratado, criando uma rede de distribuição ao longo do país e desenvolvendo a

tecnologia para veículos a etanol. Foi uma política bem-sucedida, que conseguiu aliar as condições naturais do país, a importação de tecnologia e a engenharia nacional de modo inovador e possibilitou que o país fosse o maior produtor mundial de etanol e açúcar, além de dominar completamente toda cadeia tecnológica e exportar bens de capital (SOUSA, 2015).

O início da produção e comercialização de veículos bicomcombustíveis (*flexfuel*) no Brasil entre 2003/2004, a elevação do preço do barril de petróleo, a intensificação das discussões sobre o aquecimento global e o papel dos combustíveis fósseis na problemática ambiental também alteraram profundamente as perspectivas do setor sucroenergético (GARCIA, 2007; CGEE, 2009; KOHLHEPP, 2010). Segundo Macedo (2007), o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar possui capacidade de redução das emissões de gases de efeito estufa do etanol extremamente elevada, em função de ser uma fonte renovável e por apresentar um balanço energético da ordem de 9, sendo que este valor para o etanol de milho produzido pelos EUA é da ordem de 1,3. Assim, esse novo cenário abriu novas perspectivas sobre o futuro da produção de etanol.

No período recente, o setor sucroenergético brasileiro tem atraído investimentos estrangeiros de forma relevante. Na safra 2010/2011, a participação relativa das empresas controladas pelo capital estrangeiro na capacidade total de moagem do setor alcançou 25,5% ante 11,9% na safra 2007/2008 (NASTARI, 2010). A entrada de capital externo está relacionada à consolidação do etanol como fonte alternativa ao combustível fóssil no Brasil, o qual apresenta forte tendência de aceitação no mercado internacional a partir da abertura de novos mercados, por exemplo, na União Europeia, Coreia do Sul, EUA, Japão e Caribe (UNICA, 2011).

Os fatores que podem explicar a entrada de capital externo no setor sucroenergético brasileiro são as estimativas favoráveis de consolidação de um mercado internacional para o etanol, demanda em franca expansão, bem como a entrada de novas rotas tecnológicas, como, por exemplo, o etanol de segunda e terceira geração<sup>1</sup>, além da produção de biopolímeros (MACEDO, 2007; SCHENBERG, 2010).

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia de 2024 (EPE, 2025), a oferta total de etanol passará de 31 bilhões de litros em 2015 para 36 bilhões de litros em 2018. A partir

---

<sup>1</sup> Os biocombustíveis categorizados como de primeira geração são advindos de culturas alimentares (trigo, cana-de-açúcar, beterraba e sementes oleaginosas), os de segunda geração, compostos por materiais lignocelulósicos (palha de cereais, colmos de milho, etc.), e os de terceira geração, compostos por algas (MCCORMICK, 2010).

de 2019, estima-se a retomada dos investimentos em novas unidades e, com isso, a produção deverá atingir 44 bilhões de litros em 2024 (Figura 1.1).



Figura 1.1 - Projeção da oferta de etanol (produção brasileira e importação).

Fonte: EPE, 2015.

Outro fator que contribui para a atração de capital externo é a alta competitividade que o etanol brasileiro, produzido a partir de cana-de-açúcar, tem em relação às demais matérias-primas, em especial ao etanol de milho, produzido nos Estados Unidos, e ao de beterraba, produzido na Europa (KOHLHEPP, 2010). Com uma média de 3,5 a 7 mil L . ha<sup>-1</sup> (MAPA, 2013), a elevada produtividade do etanol de cana-de-açúcar assegura um produto competitivo e atrativo para sua comercialização no mercado internacional, acrescentando ainda a tendência de redução dos custos de transporte.

Diante da importância do combustível para o Brasil é necessário ampliar o conhecimento nas diversas áreas envolvidas na produção do etanol em especial o setor agrícola, o qual ainda apresenta muito potencial de estudos, especialmente no contexto de ampliação do potencial produtivo das terras com mínimo impacto ambiental.

A cana-de-açúcar é a cultura mais promissora no que diz respeito a fontes de energia renováveis, com a produção de etanol e biomassa para cogeração de energia, a qual representa uma alternativa ambiental e econômica para reduzir as emissões de gases do efeito estufa. Diversos estudos demonstraram que, quando comparado com a gasolina, o etanol brasileiro reduz as emissões dos chamados gases de efeito estufa (GEE) em cerca de 90%. Apesar de

diferentes análises sobre o tema serem disponibilizadas, todas as regulamentações internacionais que calcularam a redução de emissões de GEE obtida pela produção e uso dos biocombustíveis reconhecem o desempenho superior do etanol de cana-de-açúcar em relação a outras matérias-primas utilizadas, como o milho, o trigo ou a beterraba, por exemplo. Em 2010, a EPA (U. S. Environmental Protection Agency) classificou ainda o etanol de cana-de-açúcar como um combustível avançado, capaz de reduzir as emissões de GEE de 61% a 91% em relação à gasolina (UNICA, 2016).

No entanto, de forma crescente, a agricultura é vista como grande contribuidora para as emissões de GEE, os quais normalmente aumentam o potencial de aquecimento global (PAG). Há evidências de que os principais impactos ambientais relacionados no setor de produção agropecuária são advindos dos fertilizantes e são bastante relevantes, tanto em sua cadeia produtiva, quanto na etapa de uso final (LIANG et al., 2012; MOSIER et al., 2013).

Acidificação e eutrofização de solos e corpos de água, assim como o Efeito Estufa são alguns dos impactos ambientais causados pelo excesso ou inadequação da aplicação de fertilizantes em áreas de produção agrícola. Também o processo produtivo dos fertilizantes é impactante, por explorar um recurso natural não renovável e por demandar um grande aporte energético (CHAVES, 2009).

O uso de fertilizantes nitrogenados tem sido identificado como fator crucial neste processo, os quais aumentam o conteúdo de N mineral no solo, favorecendo a emissão de um importante gás de efeito estufa do solo, o óxido nitroso ( $N_2O$ ), que consequentemente afeta o aquecimento global. A expressiva contribuição do setor agrícola brasileiro às emissões de  $N_2O$  indica que a necessidade de esforços, especialmente no que tange a identificação e desenvolvimento de estratégias e tecnologias eficientes em promover a redução das emissões de  $N_2O$  à atmosfera, deve ser intensificada (ZANATTA, 2009).

Somadas às emissões de metano, as emissões de óxido nitroso aumentaram em 17% de 1990 a 2005, ou seja, 58 MtCO<sub>2</sub>eq/ano. Três fontes representam 88% do aumento dessas emissões: queima de biomassa ( $N_2O$  e  $CH_4$ ), fermentação dos ruminantes ( $CH_4$ ) e emissões de  $N_2O$  do solo (IPCC, 2007). Há ainda a perspectiva de que até 2030 as emissões de  $N_2O$  aumentem em 35-60%, devido ao aumento no uso de fertilizantes nitrogenados e produção de esterco (IPCC, 2007).

No Brasil, os solos agrícolas são raramente autosuficientes no suprimento de nitrogênio às plantas cultivadas, principalmente quando a alta produtividade é o principal objetivo. A avaliação do uso de fertilizantes na cultura da cana-de-açúcar para produção do bioetanol

tonar-se de grande importância, ante o potencial de produção representado por sua utilização. A produção de açúcar e álcool está diretamente relacionada à qualidade da matéria-prima processada. A adubação, grande responsável pela qualidade da cana-de-açúcar, está voltada a proporcionar maior rentabilidade no produto final (CARVALHO, 1983).

No entanto, é preciso avaliar as formas de obtenção dos fertilizantes e os impactos que podem ser causados nos custos de produção da cultura e ambientais, já que o processo envolve emissões de gases do efeito estufa.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho consistiu na avaliação dos impactos do uso de fertilizantes minerais no desempenho econômico e ambiental da produção de cana-de-açúcar visando a produção final do produto etanol, estudando também estratégias para a sua mitigação, tendo como alternativa o uso de fertilizantes orgânicos com resíduos da cadeia de produção do setor sucroenergético, como a torta de filtro e a vinhaça.

Principais objetivos específicos:

- Avaliar a representatividade dos custos com fertilizantes nos custos totais de produção da cana-de-açúcar;
- Avaliar os custos de produção de cana-de-açúcar e do etanol considerando a utilização apenas de fertilizantes minerais e a utilização concomitante de fertilizantes orgânicos (vinhaça e torta de filtro), sendo que a vinhaça foi considerada na forma *in natura* e concentrada.
- Avaliar o impacto ambiental da utilização de fertilizantes a partir da quantificação do consumo de diesel utilizada nos diferentes cenários considerados (fertilizantes minerais, torta de filtro, vinhaça *in natura* e concentrada), bem como as emissões advindas dos fertilizantes nitrogenados. Posteriormente, modificar esses parâmetros nas entradas de um inventário de análise de ciclo de vida (ACV) do etanol.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em capítulos, de forma que o Capítulo 2 traz uma revisão sobre a importância da nutrição mineral das plantas, da adubação com macronutrientes, as exigências nutricionais da cultura da cana-de-açúcar, bem como os ganhos potenciais de produtividade representados pelo manejo adequado relacionado à adubação. Também apresenta uma revisão sobre a logística de produção dos fertilizantes, a oferta nacional e internacional dos produtos, as fontes de obtenção dos fertilizantes nitrogenados, potássicos e fosfatados e a relação de sua utilização com potenciais de poluição ao meio ambiente.

O Capítulo 3 traz as metodologias de análise dos impactos do uso de fertilizantes nos custos de produção da cana-de-açúcar e no meio ambiente, apresentando como cenários somente o uso de fertilizantes minerais, o uso de resíduos da produção de etanol - vinhaça *in natura* e torta de filtro e o uso de vinhaça concentrada e torta de filtro. O Capítulo 4 traz os resultados dos cenários propostos no capítulo anterior de metodologia, apresentando valores estimados dos custos de produção de cana-de-açúcar e emissões totais advindas do uso de fertilizantes nitrogenados.

O Capítulo 5 traz as conclusões e busca interligar as discussões dos capítulos anteriores quanto aos resultados obtidos, bem como apresentar possíveis pontos de discussão para próximos trabalhos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Importância da Adubação**

As plantas são organismos autotróficos que vivem entre dois ambientes inteiramente inorgânicos, retirando CO<sub>2</sub> da atmosfera e água e nutrientes minerais do solo. Os nutrientes minerais são adquiridos primariamente na forma de íons inorgânicos e entram na biosfera predominantemente através do sistema radicular da planta. A grande área superficial das raízes e sua grande capacidade para absorver íons inorgânicos em baixas concentrações na solução do solo, tornam a absorção mineral pela planta um processo bastante efetivo (TAIZ & ZEIGER, 2012).

No contexto da nutrição mineral, é de grande importância determinar quais nutrientes devem ser fornecidos à planta, em quantidade e na época adequada, afim de permitir que um manejo adequado da adubação seja implantado. Para isso, é necessário estudar como os nutrientes limitam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura, permitindo a otimização do uso de fertilizantes e a obtenção da maior produtividade, com o menor custo possível (CORRÊA et al., 2001).

Para o desenvolvimento adequado das plantas, necessita-se de nutrientes essenciais. Segundo Malavolta (1981), um elemento é considerado essencial quando satisfaz dois critérios de essencialidade: i) Direto - o elemento participa de algum composto ou de alguma reação, sem o qual ou sem a qual a planta não vive; ii) Indireto: na ausência do elemento a planta não completa seu ciclo de vida; ou o elemento não pode ser substituído por nenhum outro; ou o elemento deve ter um efeito direto na vida da planta e não exercer apenas o papel de, com sua presença no meio, neutralizar efeitos físicos, químicos ou biológicos desfavoráveis para a planta.

Dentre os nutrientes essenciais estão os considerados macronutrientes (carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre) são os elementos básicos que apresentam maior abundância no tecido vegetal, sendo requeridos em maior quantidade. No que se refere à adubação com macronutrientes, o objetivo é suprir as demandas do metabolismo vegetal quanto ao nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, caso os mesmos não estejam disponíveis em quantidades adequadas no ambiente de cultivo (TAIZ & ZEIGER, 2012).

São considerados macronutrientes primários o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K); macronutrientes secundários o cálcio (Ca), magnésio (Mg) e o enxofre (S); micronutrientes o boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo) e zinco (Zn).

Lopes (1989) afirma que os macronutrientes primários geralmente tornam-se deficientes no solo antes dos demais, devido à maior demanda desses nutrientes pela planta. Os macronutrientes secundários são geralmente menos deficientes e exigidos em quantidades menores, porém, a planta precisa tê-los a disposição quando e onde for necessário.

O mesmo autor também ressalta que embora sejam requeridos em menor quantidade, os micronutrientes são tão necessários às plantas quanto os macronutrientes, sendo esta separação meramente quantitativa (pelos teores encontrados nas plantas), podendo variar entre as diferentes culturas.

### **2.1.1 Nitrogênio**

O nitrogênio (N), considerado como o principal nutriente para obtenção de produtividades elevadas em culturas anuais, é constituinte de aminoácidos e nucleotídeos (CASTRO et al., 1999). O N influencia na taxa de emergência, de expansão e duração da área foliar das plantas, atuando diretamente na taxa fotossintética e na produção de biomassa (SINCLAIR & HORIE, 1989; UHART & ANDRADE, 1995). A deficiência desse nutriente provoca a degradação da molécula de clorofila, o que interfere negativamente na captação e utilização da luz solar na fotossíntese, comprometendo o crescimento e desenvolvimento da planta (SILVA et al., 2012).

Entre os elementos essenciais para a vida da planta há mais átomos de nitrogênio na matéria seca do que de qualquer outro elemento, geralmente, cerca de três vezes mais (MALAVOLTA, 1981). O nitrogênio é o nutriente mais utilizado, mais absorvido, mais exportado pelas culturas e de obtenção de maior valor devido à dificuldade na quebra de suas moléculas -  $N_2$ . Esse elemento, por ser altamente requerido pela maioria das culturas, constitui-se no fator mais limitante de produção, com exceção das leguminosas que conseguem fixá-lo de maneira diferente das demais plantas.

Apesar de ser um dos elementos mais difundidos na natureza, o nitrogênio praticamente não existe nas rochas que dão origem aos solos. Para que seja possível o aproveitamento do nitrogênio atmosférico, existem dois processos que fixam o elemento e o transferem para o solo deixando-o disponível às plantas: i) fixação biológica; ii) fixação industrial.

O processo de fixação industrial baseia-se em captar o  $N_2$  através da sua redução por H proveniente de compostos derivados do petróleo, na presença de alta temperatura ( $450^\circ\text{C}$ ), alta pressão (200 atm) e de catalisador, tendo como produto final o gás amônia ( $NH_3$ ), que é o produto base para a obtenção de adubos nitrogenados (SIQUEIRA, 1993).

A fixação biológica é responsável por 80% do N fixado por ano, podendo ocorrer tanto em ambiente aquático como terrestre (SIQUEIRA, 1993). Segundo Alves et al. (1994), a fixação biológica pode ser classificada da seguinte forma:

- Sistema livre: ocorrem livres no solo, em condições aeróbicas, dependem de umidade para proliferarem. Exemplos: Bactéria - *Beijerinckia* (3-9 kg/ha.ano<sup>-1</sup>, consorciada com a cana); *Azotobacter* (6-8 kg/ha.ano<sup>-1</sup>); *Cianobactérias* (3-12 kg/ha.ano<sup>-1</sup>);
- Associações menos íntimas: associações com a finalidade de ajuda mútua. Exemplos: Líquen - Fungo + Alga + Bactéria; *Azolla* - Cianobactéria + Pteridófita;
- Sistema simbióticos: associação de plantas + bactérias, sendo importantes para o contexto agrícola. Exemplos: Leguminosas + *Rhizobium* e cana-de-açúcar + *Acetobacter diazotrophicus*. No sistema simbiótico, a planta e a bactéria beneficiam-se mutuamente. A bactéria recebe da planta carboidratos da fotossíntese e a planta se beneficia com o N fixado pelas bactérias no interior dos nódulos. Os organismos responsáveis pela fixação são as bactérias dos gêneros *Rhizobium* (feijão), *Bradyrhizobium* (soja) e *Azorhizobium* (outras espécies).

No solo, o N está presente em formas orgânicas (ao redor de 98% do total) fazendo parte dos restos culturais e da matéria orgânica, e em formas minerais, especialmente como  $NO_3^-$  (nitrato) e  $NH_4^+$  (amônio) na solução do solo e adsorvido aos coloides, e em formas gasosas combinadas, tais como  $NH_3$ ,  $N_2O$  e NO. Da quantidade total de N presente no solo, apenas cerca de 2% encontra-se disponível às plantas. Em solo não fertilizado, o N disponível é praticamente todo proveniente da mineralização do N orgânico presente na matéria orgânica, realizada por microrganismos que transformam o N orgânico nas formas amoniacal ( $NH_4^+$ ) e nítrica ( $NO_3^-$ ), que são formas minerais passíveis de serem absorvidas pelas plantas. Considera-se, como uma estimativa média, que são liberados, anualmente, cerca de 20 a 30 kg.ha<sup>-1</sup> de N para cada ponto percentual de matéria orgânica contida no solo (STEVENSON, 1986).

O manejo adequado do nitrogênio na agricultura e pecuária é fundamental para que não haja prejuízos na relação custo/benefício, para o meio ambiente, para a nutrição das plantas e dos animais. Uma das principais fontes de nitrogênio utilizadas é a ureia, devido ao baixo custo e alta concentração de nitrogênio (45%), com ampliados riscos de perdas por volatilização de amônia, quando comparada com as demais fontes (VITTI et al., 2006).

### 2.1.2 Fósforo

O fósforo (P), quando disponibilizado em quantidades adequadas, é capaz de estimular o desenvolvimento radicular, garantir um crescimento inicial vigoroso, acelerar a maturidade fisiológica, estimular o florescimento, favorecer a formação das sementes, aumentar a resistência ao frio e aumentar a produtividade das plantas (MALAVOLTA et al., 1989).

Diversos estudos demonstram que a disponibilização adequada de P às plantas oleaginosas, como o girassol e o crambe, promove respostas satisfatórias, tanto em desenvolvimento como em produção (BAJEHBAJ et al., 2009; SILVA et al., 2011). Segundo Taiz & Zeiger (2012), a deficiência de P provoca a redução no crescimento das plantas, uma vez que esse nutriente é componente integral de compostos importantes das células vegetais, além de estar diretamente presente nos processos de transferência energética.

O fósforo encontra-se na solução como íons ortofosfatos, o qual é uma forma derivada do ácido ortofosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Este elemento pode ocorrer no solo em formas inorgânicas ou orgânicas, sendo que o último se eleva com o aumento da matéria orgânica e com a diminuição do pH. A forma química do P no solo depende do seu pH, sendo que na faixa entre 4 e 8 predomina a forma  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , sendo esta a forma preferencial de absorção pela planta. Este elemento é fortemente influenciado pela concentração de  $\text{Mg}^{2+}$ , ou seja, sinergismo (VAN RAIJ, 1991).

Ainda segundo o autor, pode ser encontrado nas seguintes condições:

- Fósforo fixado: encontra-se na forma inorgânica e está fortemente adsorvido ao solo, geralmente ligado ao Al, Fe e Ca dos minerais de argila;
- Fósforo disponível: encontra-se na forma inorgânica e está fracamente adsorvido ou presente na solução do solo;
- Fósforo solúvel: encontram-se na forma inorgânica, é disponível às plantas e está nas formas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ;

- Fósforo orgânico: refere-se ao fósforo ligado aos compostos orgânicos, como ácidos nucleicos, fosfolipídeos, etc.

As fontes minerais de fósforo são todas originadas de rochas fosfáticas, conhecidas como “fosfatos naturais”, que são encontrados na forma de compostos de ferro, alumínio e de cálcio. Os fosfatos de ferro e de alumínio têm sua solubilidade aumentada com a elevação do pH do solo. Os fosfatos de cálcio (apatitas e fosforitas), por sua vez, são mais solúveis em solos com pH ácido. No comércio, são encontradas fontes naturais de fósforo e fontes industrializadas, obtidas a partir das naturais. Existem três grupos de rochas fosfáticas ou fosfatos tricálcicos: Fluorapatitas:  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ ; Hidroxiapatitas:  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$ ; Carbonatoapatitas:  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{CO}_3$  (KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

### 2.1.3 Potássio

O potássio (K) é um nutriente que participa de um grande número de processos biológicos na planta e apresenta alta mobilidade em seus tecidos (MALAVOLTA, 1997). A limitação no suprimento de K pode causar redução gradativa da taxa de crescimento e limitar a produtividade das plantas (CASTRO & OLIVEIRA, 2005). O primeiro sintoma da falta de K nas plantas é o surgimento de manchas cloróticas, em especial nos ápices foliares, margens e entre nervuras. Devido a sua remobilização para as folhas mais jovens, os sintomas aparecem inicialmente nas folhas mais velhas (MEURER, 2006).

O K é um elemento muito abundante em rochas e em solos, sendo que grande parte se encontra em minerais que contêm o elemento nas estruturas cristalinas. Pode ser encontrado no solo nas seguintes formas:

- Rede cristalina (90 a 98%): presente nos minerais que deram origem aos solos como os feldspatos, micas e argilas micáceas;
- Fixado: (1 a 10%): imobilização do potássio pelas lâminas de argila 2:1 (vermiculita e montmorilonita);
- Trocável: todo K adsorvido nos colóides do solo;
- Solúvel: presente na solução do solo; Matéria orgânica (0,5 a 2%): liberado pela mineralização da MO, sendo a principal fonte de K orgânico (LOPES, 1989).

Segundo Van Raij (1991), em condições normais de solo e com adequado suprimento de nutrientes, é elevada a remoção de K pelas culturas. Quando têm disponíveis grandes quantidades de K, as plantas possuem a tendência de assimilar K em quantidades que excedem suas necessidades. Esse fenômeno é chamado de consumo de luxo, pois sua absorção em excesso não aumenta o rendimento das culturas.

#### 2.1.4 Cálcio

O Cálcio (Ca) é fundamental para a formação da parede celular, também influenciando o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular. Os sintomas da deficiência desse nutriente aparecem mais rápido e severamente nas regiões meristemáticas e nas folhas novas, causando deformações ou morte dos tecidos (EPSTEIN & BLOOM, 2006).

A forma predominante de Ca no solo é em sua forma iônica  $\text{Ca}^{2+}$  ou nas formas de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaHPO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{PO}_4)^{2-}$ . No entanto, pode ser encontrado em várias formas no solo:

- Minerais primários: o Ca está presente principalmente na augita, anortita, epidoto e apatita;
- Matéria Orgânica: é função do material de origem e das condições climáticas, podendo ocorrer como quelatos e/ou complexos;
- Ca-trocável: este se encontra ligado aos colóides do solo;
- Ca-disponível: todo Ca livre na solução do solo na sua forma iônica  $\text{Ca}^{2+}$  (LOPES, 1989).

O Ca tem sua origem primária nas rochas ígneas, estando contido em minerais como a dolomita, calcita, apatita, feldspatos cálcicos e anfibólios, que ocorrem também em rochas sedimentares e metamórficas. Em solos especialmente ácidos de clima tropical esses minerais são intemperizados e o Ca é, em grande parte, perdido por lixiviação (VAN RAIJ, 1991).

#### 2.1.5 Magnésio

O magnésio (Mg) é o constituinte central das moléculas de clorofila a e b<sup>2</sup>, também participando do transporte de P na planta e na ativação de enzimas. A deficiência desse

---

<sup>2</sup> As clorofilas são os pigmentos naturais mais abundantes presentes nas plantas e ocorrem nos cloroplastos das folhas e em outros tecidos vegetais. As clorofilas a e b encontram-se na natureza numa proporção de 3:1, respectivamente, e diferem nos substituintes de carbono C-3. Na clorofila a, o anel de porfirina contém um grupo metil (-CH<sub>3</sub>) no C-3 e a clorofila b (considerada um pigmento acessório) contém um grupo aldeído (-CHO), que

nutriente provoca a translocação do Mg presente nas folhas mais velhas, em direção aos tecidos em crescimento, causando cloroses nas folhas mais velhas, com posterior necrose do limbo foliar (VITTI et al., 2006).

O Mg é encontrado no solo em menores quantidades que o Ca, estando presente ligado a:

- Mineral primário: os principais são os piroxênios, anfibólios, olivinas, turmalinas, muscovita e biotita;
- Mineral secundário: vermiculita, montmorilonita, ilita e clorita;
- Carbonatos e sulfatos:  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ;
- Matéria orgânica: encontra-se num teor dez vezes maior que o K;
- Colóides: Mg trocável;
- Solução: todo Mg em forma imediatamente disponível à planta (VAN RAIJ, 1991).

### 2.1.6 Enxofre

O enxofre (S) desempenha diversas funções no metabolismo das plantas, entre elas, destaca-se sua participação na composição de aminoácidos, grupos prostéticos, proteínas, além de atuar como catalisador orgânico de algumas enzimas. A carência de S pode causar clorose nas folhas mais novas, reduzir o tamanho das folhas, promover o enrolamento das margens foliares, necrose, desfolhamento e a formação de internódios curtos. Além disso, é possível verificar limitação da fotossíntese e da atividade respiratória, afetando o crescimento e desenvolvimento das plantas (EPSTEIN & BLOOM, 2006).

Segundo os mesmos autores, a maior fonte de S para as plantas no solo é a matéria orgânica (MO), a qual possui cerca de 80 a 90% do S total do solo. Na MO, o S encontra-se ligado a compostos fenólicos (S não ligados a C) e ligados a aminoácidos (S ligado a C). Em solos arejados, o S encontra-se na forma oxidada, ou seja, na forma de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) que é aproveitável pela planta.

O S é absorvido ativamente pelas raízes principalmente na forma de  $\text{SO}_4^{-2}$ . No entanto, as folhas também podem absorver o gás  $\text{SO}_2$  existente na atmosfera, porém é pouco eficaz. As raízes são capazes de absorver S orgânico como aminoácido (cistina e cisteína) (BRASIL, 2010).

---

substitui o grupo metil-CH<sub>3</sub> A estabilidade da clorofila b deve-se ao efeito atrativo de elétrons de seu grupo aldeído no C-3 (VON ELBE, 2000).

## 2.2 Exigências Nutricionais e Balanço de Nutrientes

O balanço de nutrientes é uma das ferramentas para avaliação do uso de fertilizantes. Para que a produção agrícola seja uma atividade sustentável, é necessário que os nutrientes removidos do solo sejam repostos por meio da aplicação de fertilizantes e estes alcancem elevados índices de aproveitamento.

A adubação, de modo geral, pode ser definida pela necessidade nutricional da cultura subtraindo os nutrientes fornecidos pelo solo e multiplicado por um fator de eficiência de absorção (f), ou seja,  $Adubação = (planta-solo) \times fator (f)$ . O fator (f) caracteriza-se por ser o fator de eficiência na absorção dos nutrientes aplicados via fertilizantes minerais, visando corrigir as perdas de absorção dos nutrientes causadas por erosão, lixiviação, volatilização, desnitrificação biológica do nitrato e fixação (RIPOLI, 2007).

Um dos maiores desafios atuais no que diz respeito à fertilidade do solo é fornecer quantidades suficientes de nutrientes para que as culturas possam expressar seu potencial de produtividade, sendo ao mesmo tempo economicamente viável e ambientalmente seguro. A forma mais eficiente para determinar a quantidade necessária de fertilizantes é a análise de solo (SCHLINDWEIN, 2003).

A recomendação correta da dosagem de fertilizantes é fundamental para a alocação correta dos nutrientes, o que gera economia de insumos e aumento da produtividade, maior eficiência técnica e econômica do capital investido. Esta se baseia na fertilidade atual do solo, através da realização da análise de solo, que identifica o potencial de resposta aos nutrientes para cada ecossistema, por um sistema de classes de interpretação da disponibilidade destes nutrientes para as plantas (EMBRAPA, 2008).

A revisão das exigências nutricionais da cultura da cana-de-açúcar aqui apresentada se limitará principalmente aos elementos nitrogênio, potássio e fósforo.

### 2.2.1 Exigências Nutricionais e Balanço de Nutrientes na Cana-de-Açúcar

O nitrogênio é importante na nutrição e fisiologia da cana-de-açúcar, pois, dentre outras funções, é constituinte das proteínas e dos ácidos nucleicos (MALAVOLTA et al., 1989), sendo esse elemento, juntamente com o potássio, absorvido em maiores quantidades pela cultura (OLIVEIRA et al., 2002a). O N absorvido aumenta a atividade meristemática da parte

aérea, resultando em maior perfilhamento e índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar. Além disso, o N aumenta a longevidade das folhas. Esse incremento no IAF eleva a eficiência do uso da radiação solar, medida como taxa de fixação de gás carbônico ( $\mu\text{mol de CO}_2 / \text{m}^2 / \text{s}$ ), aumentando, portanto, o acúmulo de matéria seca.

O acúmulo de N pela cana-de-açúcar varia de acordo com a cultivar, a idade da cultura e a disponibilidade do N e de outros elementos na solução do solo e também depende de fatores edafoclimáticos. Para as variedades atualmente mais plantadas, trabalhos conduzidos por Oliveira et al (2002a) indicaram que a extração de N oscila em torno de  $1,2 \text{ kg t}^{-1}$  de matéria natural da parte aérea. Pode-se estimar que para cada tonelada de matéria natural acumulada pela parte aérea ocorre absorção de  $1,5 \text{ kg}$  de N pela planta. Portanto, para sistemas com produtividade superior a  $120 \text{ t ha}^{-1}$  de matéria natural, a quantidade de N absorvida pela cultura ultrapassa, então,  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Deve-se ressaltar, entretanto, que se verificou baixa resposta da cana planta à adubação nitrogenada e as causas dessa baixa resposta não estão suficientemente esclarecidas. Vários autores atribuíram-na à variabilidade experimental, à mineralização da matéria orgânica (MO) e dos restos culturais, às épocas de aplicação do fertilizante e às perdas por lixiviação e desnitrificação (CANTARELLA; RAIJ, 1986; DEMATTÊ, 1997).

As respostas nas rebrotas de cana à adubação nitrogenada são mais frequentes que na cana planta, com percentual acima de 90%. Como recomendação geral, sugere-se aplicar  $1,0 \text{ kg}$  de N por tonelada de matéria natural acumulada na parte aérea. Uma vez que os colmos industrializáveis representam em média 80% da matéria natural da parte aérea, produtividades de  $100 \text{ t}$  de colmos corresponderiam a  $125 \text{ t}$  de matéria natural. Nesse caso, a recomendação de adubação seria de  $125 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, devendo o adubo nitrogenado ser aplicado, em dose única, juntamente com o potássio. A ureia tem sido o fertilizante nitrogenado mais usado na adubação da cana em razão, principalmente, do menor custo por unidade de N, em comparação com outras fontes. A aplicação de ureia sobre o solo ou sobre a palhada poderá levar a grandes perdas de N por volatilização de amônia, da ordem de 40% (OLIVEIRA et al., 2007).

As doses de fósforo (P) aplicadas nas adubações são bem maiores que as quantidades exportadas, já que normalmente a utilização de P pela cana é de 10 a 15% da quantidade total do fertilizante aplicado (TOMAZ, 2009). Em solos tropicais, os principais fatores responsáveis por essa baixa eficiência da adubação fosfatada é o alto teor de óxidos de ferro e alumínio, que promovem a fixação do elemento e dessa forma, recomendam que a melhor forma de aplicação de P em cana-de-açúcar é em área total, onde o P melhor distribuído na

área, contribui para o enraizamento, aumentando assim, o volume de solo explorado (ROSSETTO et al., 2008).

Segundo Malavolta (2006), trata-se do nutriente que mais limita a produção vegetal no Brasil e, a elevação de sua disponibilidade, de forma a vencer a barreira imposta pela “fama do solo” por este nutriente, é um dos grandes desafios no manejo da fertilidade do solo. Como característica auxiliar o fósforo tem a propriedade de aumentar a eficiência da utilização de água pela planta, bem como a absorção e a utilização de outros nutrientes, sejam eles advindo do solo ou adubo, contribuindo para aumentar a resistência da planta a algumas doenças, a suportar baixas temperaturas e falta de umidade (KORNDORFER, 2004).

De acordo com Lana et al. (2004), a baixa eficiência das adubações fosfatadas evidencia a necessidade de novos métodos de adubação no que diz respeito a fontes, épocas de aplicação e localização do adubo. Logo, a eficiência do P aplicado varia de acordo com os tipos de fertilizantes fosfatados (ERNANI & BARBER, 1991), o método de aplicação (ANGHIONI, 1992) e com a qualidade aplicada (ERNANI et al., 2000).

O potássio (K) desempenha diversas funções metabólicas e estruturais na planta. Nos solos da região tropical, os teores de K normalmente são baixos (normalmente inferiores a  $1,5 \text{ mmolc.dm}^{-3}$ ), tornando necessária a complementação desse nutriente com fertilizantes para possibilitar produtividades sustentáveis. O K, seguido pelo N, é o nutriente mais absorvido pela cana-de-açúcar. Para cada  $100 \text{ t ha}^{-1}$  de colmos, são exportados cerca de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  (MALAVOLTA, 1981), embora em solos com teores elevados de K a exportação pelos colmos possa atingir  $285 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  (FRANCO et al., 2008).

O K do solo é formado pelo K da solução, K trocável, K não trocável (fixado) e o K estrutural, e o suprimento de K para as plantas advém da solução e dos sítios de troca dos coloides do solo, que estão em equilíbrio com o K não trocável e com o K estrutural dos minerais (SPARKS & HUANG, 1985). O teor trocável é a principal fonte de reposição do K para a solução (RAIJ, 1991), o qual, por sua vez, pode ser absorvido pelas plantas, adsorvido às cargas negativas do solo ou perdido por lixiviação. Dessa maneira, recomenda-se realizar a aplicação desse nutriente conforme as plantas se desenvolvem, visando reduzir as perdas no sistema solo-planta e aumentar a eficiência de utilização desse nutriente. Entretanto, no setor sucroenergético a aplicação do K no plantio normalmente é feita de uma única vez, com dose que varia de  $80$  a  $140 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  (LANA et al., 2004).

O K adicionado via adubação potássica, assim como aquele disponibilizado da palha que permanece sobre o solo, pode ser intensamente lixiviado no perfil do solo, dependendo da

quantidade de chuva, da dose de nutriente e da textura do solo, entre outros fatores (ROSOLEM et al., 2006). Rosolem & Nakagawa (2001) observaram aumento na lixiviação de K no perfil de um solo de textura média quando foram aplicadas doses acima de  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  por ano, independentemente do modo de aplicação do fertilizante. Além de favorecer a lixiviação, o K aplicado em doses elevadas e de uma única vez pode causar a salinização da região que recebe o fertilizante, podendo causar toxidez às raízes das plantas. Alvarez & Freire (1962) observaram que plantas de cana-de-açúcar que receberam doses mais elevadas de K ( $270 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ), aplicadas de uma única vez no plantio, apresentaram sintomas atribuídos ao excesso do nutriente.

A vinhaça pode substituir a adubação potássica, devendo a quantidade de K fornecida por ela ser, assim, integralmente deduzida da adubação mineral. O volume de vinhaça aplicado tem variado de  $60$  a  $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , dependendo da concentração de K. A concentração de K na vinhaça originária do mosto misto é, em média, duas vezes maior que na vinhaça originária do caldo, com valores oscilando em torno de  $2,5$  e  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente (OLIVEIRA et al., 2007).

As quantidades de nutrientes extraídos e exportados pela cultura da cana-de-açúcar podem ser observadas na Tabela 2.1 a seguir.

Tabela 2.1 - Extração e exportação de macronutrientes para a produção de 100 t de colmos.

	N	P	K	Ca	Mg	S
<b>Partes da Planta</b>	<b>kg.100 t<sup>-1</sup></b>					
Colmos	83	11	78	47	33	26
Folhas	60	8	96	40	16	18
<b>Total</b>	143	19	174	87	49	44

Fonte: Orlando F.º, 1993.

As exigências de macronutrientes para produção de 100 toneladas de cana são apresentadas segundo Orlando Filho, Souza e Zambello Jr. (1980):

- Adubações de plantio: N: varia de  $40$  até  $70 \text{ kg ha}^{-1}$  de acordo com o ambiente de produção e formulação utilizada; P: entre  $80$  até  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de acordo com análise de solo; K: entre  $80$  até  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de acordo com análise de solo.
- Adubações de soca: N: varia de  $90$  a  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de acordo com o ambiente de produção e produtividade esperada; P: entre  $25$  até  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de acordo com o ambiente de produção e produtividade esperada; K: entre  $100$  até  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de acordo com o ambiente de produção e produtividade esperada.

### 2.3 Relação da Produtividade e Custos de Produção

A produtividade agrícola da lavoura brasileira de cana-de-açúcar atingiu, em 2007, a marca histórica de 11.200 kg de Açúcares Totais Recuperáveis (ATR) por hectare (ATR/ha), nível quase 130% superior ao verificado em 1975, no início do Programa Nacional do Alcool (Proálcool). Essa evolução se deveu, em boa medida, ao desenvolvimento das tecnologias agrícolas de produção, notadamente pela introdução de novas variedades de cana. Desse modo, até o fim da década passada, a produção brasileira de cana-de-açúcar era celebrada como paradigma mundial de eficiência agrícola (BNDES, 2013).

Contudo, a performance nos últimos anos passou a apresentar trajetória distinta, com anos seguidos de reduções de produtividade, ainda que, no longo prazo, a trajetória continue crescente. Em 2011 e 2012, por exemplo, a produtividade da lavoura canavieira ficou abaixo do patamar de 10.000 kg de ATR/ha. Diversos fatores conjunturais podem explicar essa tendência, como a baixa renovação de canaviais e as adversidades climáticas verificadas nos últimos anos (BNDES, 2013).

De natureza conjuntural, a crise financeira de 2008-2009, por exemplo, deixou em situação frágil a maior parte dos grupos econômicos do setor sucroenergético. Nesse contexto, houve acentuada retração do crédito concedido pelas instituições financeiras às empresas do setor, cujo endividamento foi crescente. Por conta disso, houve redução nos investimentos agrícolas, incluindo aqueles direcionados à renovação dos canaviais. No estado de São Paulo, o estágio médio de corte da cana alcançou 3,7 anos em 2011 (CTC, 2012). A redução da taxa de renovação e, por consequência, a maior longevidade dos canaviais redundam em menor taxa de difusão das novas variedades.

Uma recente expansão da cultura ocorreu em regiões de fronteira, como nos estados do Centro-Oeste do Brasil, onde os solos têm menor disponibilidade de nutrientes e o clima é mais adverso quando comparados aos solos e clima das regiões tradicionais de produção, sendo que, para essas condições, o número de variedades novas está restrito (DEMATTE, 2012).

A expectativa de expansão da área cultivada de cana-de-açúcar, de 8,5 milhões de hectares, em 2012, para cerca 14 milhões de hectares em 2030, vai requerer alterações significativas em todo o sistema de mecanização atualmente empregado para pôr a atividade em níveis adequados de sustentabilidade. A cana-de-açúcar é uma cultura semipereña cujo

processo de produção prevê uma colheita por ano, produzindo em média 81 t/ha/ano, no território brasileiro, se as principais condições edafoclimáticas e de preparo e manejo de solo forem atendidas (BRAUNBECK & MAGALHÃES, 2010).

A produtividade média dos canaviais, incluindo os colmos industrializáveis, as folhas secas e os ponteiros, tem oscilado em torno de 100 t ha<sup>-1</sup> de matéria natural e esses colmos correspondem a, aproximadamente, 80% dessa massa. Entretanto, adotando manejo adequado de variedades, de calagem e de adubação e tratos culturais adequados, podem-se alcançar produtividades superiores a 150 t ha<sup>-1</sup> de matéria natural. Sob irrigação complementar, a produtividade média da cana pode ultrapassar a 200 t ha<sup>-1</sup> anuais de matéria natural (OLIVEIRA et al., 2002b), o que a torna ainda mais competitiva.

O planejamento das atividades envolvidas diretamente com a cultura da cana-de-açúcar, desde o plantio até a colheita, é uma etapa muito importante na sua exploração econômica, definindo uma série de técnicas a serem adotadas, como, insumos, máquinas, implementos, adubações e escolha de variedades (SILVA JUNIOR & CARVALHO, 2010).

Segundo PECEGE (2015), comparativamente à safra 2013/14, a produtividade agrícola da cana própria de usinas produtoras de açúcar e etanol apresentou queda em todas as regiões consideradas no levantamento de custos de produção na safra 2014/15, realizado pela instituição. A estiagem durante os verões de 2013 e 2014 prejudicou o desenvolvimento da cana e acarretou em uma queda de 5,85% na produtividade na região Tradicional (composta pelos estados de São Paulo e Paraná). Cabe destacar que o rendimento físico por unidade de área, isto é, a produtividade constitui um índice de aproveitamento dos recursos, os quais são inversamente proporcionais aos custos da produção.

No levantamento de custos de produção agroindustriais da cana-de-açúcar, açúcar e etanol realizado pelo PECEGE (2015), o último resultado disponibilizado (safra 2014/15) demonstra que os custos agroindustriais apresentaram aumento nas regiões de pesquisa consideradas, principalmente devido à elevação do custo com matéria-prima. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Custo de produção agroindustrial de processamento da cana-de-açúcar (R\$/t)  
por região.

Descrição	Região		
	Tradicional	Expansão	Nordeste
<b>Matéria-prima</b>	<b>82,89</b>	<b>83,24</b>	<b>88,12</b>
COE	62,57	59,41	65,35
Canas de fornecedores	26,53	17,18	27,63
Pagamento	24,07	15,41	26,10
Bonificações	2,46	1,77	1,54
COE cana própria	36,04	42,23	37,71
Depreciações	13,05	16,26	13,86
Remuneração do capital e terra	7,26	7,57	8,91
<b>Industrial</b>	<b>27,93</b>	<b>28,34</b>	<b>28,86</b>
Operação industrial	14,49	14,58	15,55
Mão-de-obra	6,05	5,83	6,69
Insumos	2,35	2,63	3,77
Químico	1,29	1,51	1,93
Diversos	0,54	0,69	0,73
Embalagem	0,52	0,43	1,11
Manutenção	5,15	4,80	4,30
Administração	0,94	1,32	0,78
Depreciação	4,14	4,23	4,10
Custo de Capital	9,31	9,53	9,22
<b>Administrativo</b>	<b>12,30</b>	<b>12,91</b>	<b>12,36</b>
Mão-de-obra	2,69	3,01	3,35
Insumos e serviços	3,11	3,40	3,68
Capital de giro	6,50	6,51	5,33
<b>Custo Total</b>	<b>123,11</b>	<b>124,49</b>	<b>129,34</b>

Fonte: PECEGE (2015).

Considerando-se a adubação e a nutrição da cana-de-açúcar dentro do contexto das etapas agrícolas envolvidas com a cultura da cana-de-açúcar e sua viabilidade econômica, pode-se dizer que as eficiências de aplicação, no incremento da produtividade, serão tanto maior quanto maior for o ajuste dos fatores de produtividade – ano agrícola (déficit hídrico, precipitação), solo e variedades (VITTI et al., 2006).

A existência de uma relação estreita entre taxas de consumo de fertilizantes e produtividade agrícola tem sido estabelecida. Entre os vários insumos agrícolas, os fertilizantes, junto com, talvez, a água, são os que mais contribuem para o aumento da produção agrícola (ISHERWOOD, 2000).

Segundo o Banco Mundial (2009) e a FAO (2013), o uso de fertilizantes tem auxiliado significativamente a aumentar as produtividades das culturas globais e, de acordo com o Banco Mundial, seu baixo uso tem contribuído para o lento crescimento da produtividade agrícola da África, por exemplo.

Em relação a como pode-se fomentar a produção de alimentos no futuro, a FAO (2013) prevê que, até 2061, 77% do crescimento futuro na produção agrícola será proporcionado por aumentos de produtividade, com 14% a partir de aumento da intensidade de cultivo e 9% a partir de novas áreas sob cultivo, sendo que os fertilizantes são o insumo chave para aumentar a produtividade.

O uso mais preciso de fertilizantes pode ajudar a aumentar sua eficiência e a relação custo-eficácia. Isto significa usar a fonte correta do nutriente, na dose correta, na época correta e no local correto. Aumentos de eficiência de 10 a 30% podem ser conseguidos a partir do gerenciamento preciso do uso de fertilizantes (FAO, 2013 e IFDC, 2012).

## **2.4 Produção e Logística dos Fertilizantes - Nacional e Importados**

Os fertilizantes estão definidos na legislação brasileira, conforme Decreto nº 8.384, de 29 de dezembro de 2014, como “substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes das plantas” (BRASIL, 2014). Eles têm como função repor ao solo os elementos retirados em cada colheita, com a finalidade de manter ou mesmo ampliar o seu potencial produtivo. Seu uso é fundamental para o aumento da produtividade (DIAS, 2006).

Malavolta *et al.* (2002) definem que os principais fertilizantes utilizados para adequação dos solos às necessidades nutricionais das plantas são os chamados macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio. As principais matérias-primas utilizadas na produção de fertilizantes são o petróleo e gás natural (para os nitrogenados); enxofre e rocha fosfática (para os fosfatados) e rocha potássica (para os potássicos).

A formulação básica dos fertilizantes NPK é uma composição de três elementos químicos: nitrogênio, fósforo e potássio. A proporção de cada elemento nessa combinação depende do fim a que se destina e das condições físico-químicas do solo a ser adubado. A fórmula NPK é utilizada para indicar o conteúdo percentual de nitrogênio em sua forma

elementar (N), o conteúdo percentual de fósforo na forma de pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) e o conteúdo percentual de potássio na forma de óxido de potássio ( $K_2O$ ) (LIMA, 2007).

Do ponto de vista físico, os fertilizantes podem ser sólidos ou fluidos. Os primeiros são os mais comuns e são comercializados na forma de grânulos ou pó. Do ponto de vista químico, os fertilizantes podem ser orgânicos, organominerais ou minerais, sendo que estes últimos são subdivididos em fertilizantes simples e mistos (LIMA, 2007).

A cadeia produtiva de fertilizantes é composta pelo segmento extrativo mineral, que fornece a rocha fosfática, o enxofre e as rochas potássicas, pelo segmento que produz as matérias-primas intermediárias como o ácido sulfúrico, o ácido fosfórico e a amônia anidra, pelo segmento produtor de fertilizantes simples e pelo segmento produtor de fertilizantes mistos e granulados complexos (NPK) (DIAS, 2006).

As matérias-primas podem ser obtidas por meio da indústria petrolífera (nitrogenados) ou de atividades de extração mineral (fosfatados e potássicos). As fontes destes elementos químicos são obtidas na natureza, para a posterior extração dos ácidos, com os quais pode-se gerar uma ampla variedade de produtos, dentre eles, produtos que contenham nitrogênio, fósforo e potássio, que fornecem as quantidades necessárias de cada elemento para compor diferentes formulações de fertilizantes (LIMA, 2007).

Segundo Taglialegna, Paes Leme e Sousa (2001), a indústria de fertilizantes pode ser dividida em três atividades distintas: produção de matérias-primas básicas e intermediárias, de fertilizantes básicos e misturas. Na primeira atividade, as empresas produzem as matérias-primas básicas (gás natural, rocha fosfática e enxofre) e intermediárias (ácido sulfúrico, ácido fosfórico e ácido nítrico). Na segunda atividade, fabrica-se os fertilizantes básicos nitrogenados (ureia, nitrato de amônio, nitrocálcio e sulfato de amônio), fosfatados (superfosfato simples, superfosfato triplo, fosfatos de amônio e fosfato natural acidulado) e potássicos (cloreto de potássio e sulfato de potássio). Na terceira atividade, a de misturas, as empresas atuam como misturadoras que comprem matérias-primas e fertilizantes básicos e elaboram as formulações NPK nas dosagens adequadas ao tipo de solo ou cultura agrícola.

A Figura 2.1 reproduz, esquematicamente, toda a cadeia produtiva de fertilizantes minerais, cujo complexo produtor envolve atividades que vão desde a extração da matéria-prima até a composição de formulações aplicadas diretamente na agricultura.

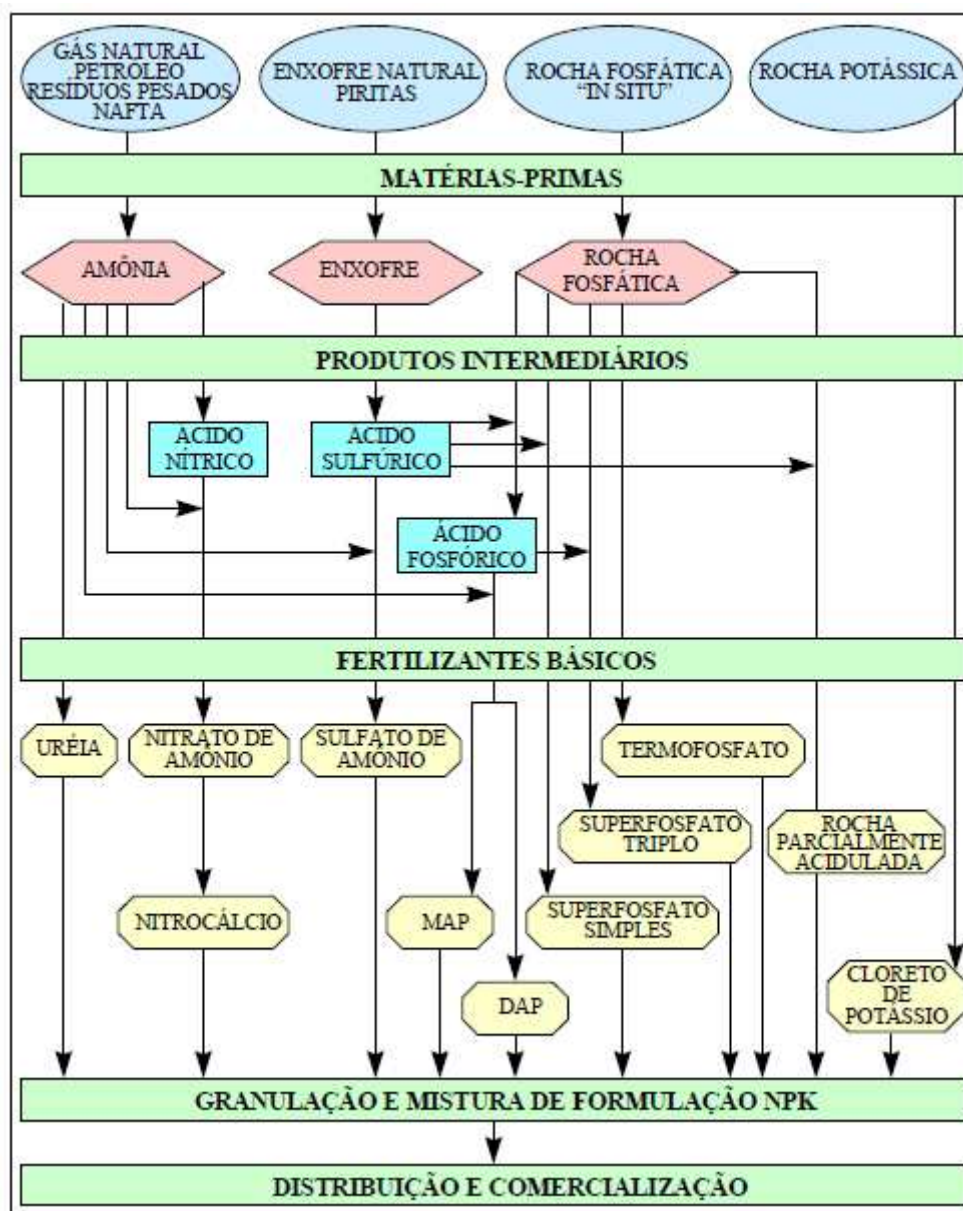


Figura 2.1 - Cadeia produtiva dos fertilizantes.

Fonte: PETROFÉRTIL/COPPE-UFRJ (Ano 1992) – Modificado de Dias (2006).

De acordo com a Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes (IFA, 2016), os maiores produtores de fertilizantes minerais no mundo são: a China (30%), a Índia (9%), a Rússia (8,5%) e os Estados Unidos (12%), o Brasil ocupa a nona posição, representando apenas 1,2% de todo NPK produzido, consumindo 7,4% de todo o fertilizante utilizado no mundo, sendo necessária a importação de mais de dois terços das necessidades de fertilizantes minerais. Para atender à demanda de consumo interno, o Brasil importou, em 2013, 73% dos fertilizantes nitrogenados, 46% do fósforo utilizado pela agricultura do país e 92% do potássio.

Gonçalves et al (2008) revisaram a produção nacional dos nutrientes separadamente, constatando que a produção de nitrogênio (N) no período 1950-58 era de 5,63% e 5,56%; em 1959, foi 24% e hoje apenas 25% do que o Brasil consome. A produção de fósforo (P) no período 1950-64 aumenta de 12,45% para 72,77%, porém, recua para 34,33% em 1972, correspondendo hoje a 49% do consumo nacional. Já o potássio (K) no período entre 1950-1985 não teve produção no Brasil. De 1985 em diante, inicia-se a produção que chega a 15,19% em 1999 e hoje não representa mais que 9%.

Conforme avaliação de Boteon e Lacerda (2009), os principais fatores que valorizaram os fertilizantes no Brasil foram: o crescimento econômico e o consequente aumento no consumo de alimentos em países em desenvolvimento; o encarecimento do frete para a matéria-prima chegar ao Brasil, devido às distâncias do ponto de extração até o local de consumo; as barreiras protecionistas chinesas, que elevaram o tributo de exportação da matéria-prima em 135% para evitar uma possível escassez de oferta local e o aumento no preço do barril de petróleo elevando o custo do frete.

Portanto, é necessário equacionar o suprimento dos fertilizantes a custos competitivos para as diversas cadeias produtivas, sendo que a agricultura brasileira passa por um processo de expansão, motivada por um crescimento da demanda externa e interna.

A China é o principal país consumidor de fertilizantes, com um total de 51,0 milhões de toneladas, seguido pela Índia, Estados Unidos, Brasil com aproximadamente 13,5 milhões de toneladas e Indonésia, porém o consumo nos países citados, exceto Brasil, tende a estagnar por não possuírem áreas para expansão da agricultura ou, se possuem, as mesmas não podem ser aproveitadas (IFA, 2016). Ao contrário, países africanos, e principalmente o Brasil, podem e vêm aumentando sua área agrícola.

No Brasil, os fertilizantes representam cerca de 25% de todo o déficit do setor químico, em torno de US\$ 8 bilhões por ano, embora o agronegócio brasileiro tenha muitas vezes garantido o superávit da balança comercial do país e seja também o setor que mais emprega na cadeia produtiva da economia brasileira. É necessário alcançar, pelo menos, um equilíbrio da balança comercial brasileira por meio da expansão da produção interna, visando a reduzir a dependência externa pela substituição de importações. A viabilidade de novas unidades depende fundamentalmente de três fatores: investidor, fonte de financiamento e garantia de fornecimento do gás natural (LIMA, 2007).

A importante participação dos fertilizantes como insumo para a produção agrícola e o deslocamento dessa produção para novas fronteiras agrícolas, juntamente com a concentração

da cadeia produtiva, desde as matérias-primas até os fertilizantes básicos e misturas NPK, tornam essa indústria muito atrativa.

O mercado brasileiro é intensamente sazonal, praticamente 70% das vendas de fertilizantes concentram-se no segundo semestre do ano, quando ocorre o plantio da safra de verão. Em épocas normais de equilíbrio climático, com o agricultor mais capitalizado, pode haver antecipação de parte das compras para o primeiro semestre. O consumo de fertilizantes no Brasil está concentrado em algumas culturas, principalmente soja e milho, que juntas representam mais da metade da demanda nacional (DIAS, 2006).

A produção de insumos para fertilizantes nitrogenados depende da oferta de amônia e enxofre que, por sua vez, são subprodutos derivados do petróleo e gás natural. Em relação ao potássio, o Brasil não possui elementos químico-minerais de fácil acesso e no caso do fósforo, atualmente o insumo menos dependente das importações, há pouca qualidade na lavra, uma vez que a rocha fosfática brasileira é considerada ígnea (rochas magmáticas ou rochas eruptivas) tornando o Brasil cada vez mais “dependente” dos produtos externos (Figura 2.2) (SAAB et. al., 2008).

A demanda por fertilizantes cresce mais do que a capacidade produtiva o que faz com que a vulnerabilidade do Brasil aumente em relação às variações dos preços no mercado internacional. No país, a concorrência no setor de insumos é limitada pela carência de investimentos e pela existência de poucos “players”. Dessa forma se faz necessários investimentos tanto na área de produção quanto na infraestrutura logística do Brasil (UNCTAD, 2005).

São importados atualmente mais da metade dos produtos usados na fabricação de adubos. Em outros países que também possuem alta produção de alimentos esses índices são diferentes, tornando o Brasil altamente dependente dessas importações.

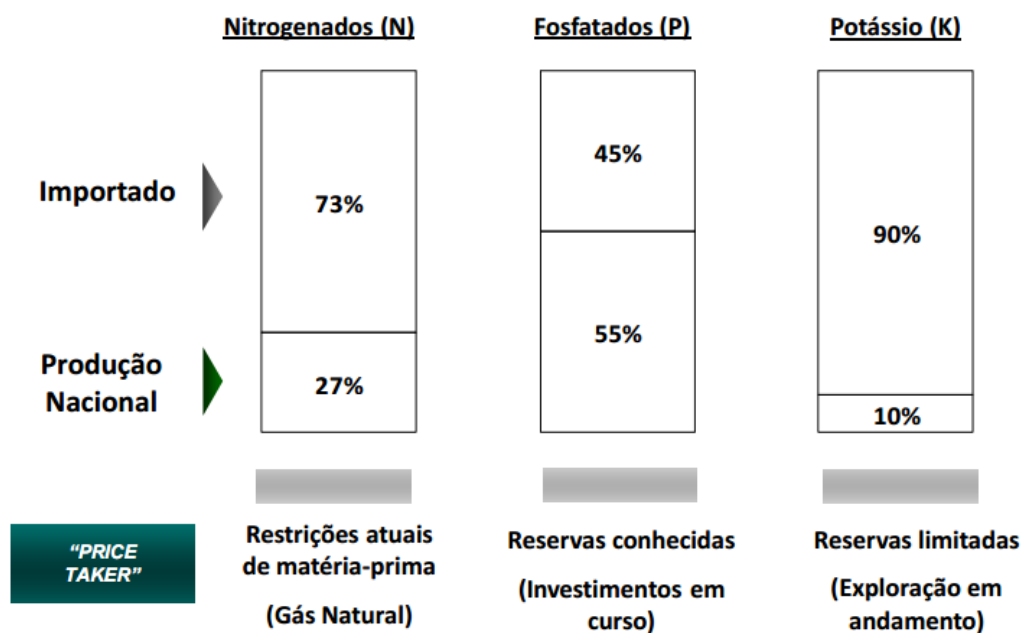


Figura 2.2 - Participação da Produção Nacional e Importações na oferta de fertilizantes (média 2006-2010).

Fonte: ANDA (2011).

Aproximadamente 60% do total da produção final de fertilizantes são realizadas por apenas três grupos multinacionais, mas este controle e poder de mercado na indústria de fertilizantes são ainda mais visíveis e fortes porque se estende às “trading companies”, pertencentes ou sócias dos mesmos grupos fertilizantes. Estas empresas comercializam também os produtos agrícolas e os grãos, junto ao sexto elo da cadeia do NPK, sendo controladores simultaneamente nas duas pontas da cadeia de commodities agrícolas e fertilizantes, fazendo com que esse mercado no Brasil se configure como um oligopólio (MME, 2009).

#### 2.4.1 Fertilizantes Nitrogenados

Os fertilizantes nitrogenados, de acordo com Gonçalves et al. (2008), tem em sua composição o nitrogênio como nutriente principal e se originam da fabricação da amônia anidra, que é a matéria-prima básica de todos os nitrogenados sintéticos. Para obtenção da amônia, utilizam-se petróleo e gás natural. As atuais fábricas de amônia para fins fertilizantes no Brasil utilizam gás natural, gás de refinaria ou resíduo asfáltico como matéria-prima.

Portanto, a amônia é o principal insumo para obtenção dos fertilizantes nitrogenados e suas unidades produtivas geralmente são instaladas perto de refinarias petroquímicas. No futuro, apesar da tendência de aumento de preço, o gás natural tende a ser o escolhido, pois reúne melhores condições energéticas e ambientais.

Segundo Dias e Fernandes (2006), a amônia anidra é um gás obtido pela reação do gás de síntese, uma mistura na relação 1:3 de nitrogênio (N) proveniente do ar com o hidrogênio (H) de fontes diversas: gás natural, nafta, óleo combustível ou de outros derivados de petróleo. O gás natural é o mais usado e também a melhor fonte de hidrogênio para a produção de fertilizantes nitrogenados. Para isso são necessárias alta temperatura, pressão e catalizadores que fazem o papel do complexo presente na fixação biológica em condições naturais.

A ureia apresenta 45% de N, na forma amidica  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  (MALAVOLTA, 2006). A síntese para a produção de ureia, a partir de amônia e gás carbônico, produzidos numa mesma unidade, torna o produto menos oneroso que os demais fertilizantes, inclusive pelo fato da ureia possuir teor de N bem mais alto, comparada aos demais produtos, o que proporciona um preço mais atrativo por tonelada de N (FRANCO e NETO, 2007). Um dos cuidados necessários para aumentar a eficiência da ureia é, se possível, minimizar as perdas por volatilização. Tais perdas ocorrem através da liberação da amônia formada, devido à ação da enzima chamada uréase, que catalisa a hidrólise da ureia, decompondo-a em amônia e gás carbônico.

O sulfato de amônio apresenta 20% de N e 24% de S, na forma amoniacal (MALAVOLTA, 2006). O teor de S torna esta fonte atrativa, principalmente para aplicação em solos carentes desse nutriente, característica típica de muitas regiões do Brasil. A participação do sulfato de amônio na matriz nitrogenada do mundo se situa em torno de 4% e não tem havido grande variação de consumo ao longo das últimas décadas. No Brasil, no entanto, sua participação é bem maior, em torno de 16% em 2006. Sendo muito usado em diversas culturas, como na cana-de-açúcar, devido a carência de S nos solos brasileiros (FRANCO e NETO, 2007).

Já o nitrato de amônio apresenta 32% de N, com N 50% amoniacal e 50% nítrico (MALAVOLTA, 2006). Produto sólido, perolado ou granulado que possui grande valor agrônômico por conter amônia e nitrato, sofre menor perda por volatilização e acidifica menos o solo, comparado aos já referidos adubos nitrogenados (FRANCO e NETO, 2007). Cerca de 80% da produção mundial de nitrato de amônio se concentra na Europa, Estados Unidos e na

antiga União Soviética, sendo que estas mesmas regiões concentram 72% do consumo do produto. A Figura 2.3 mostra a rota de produção de alguns fertilizantes nitrogenados.

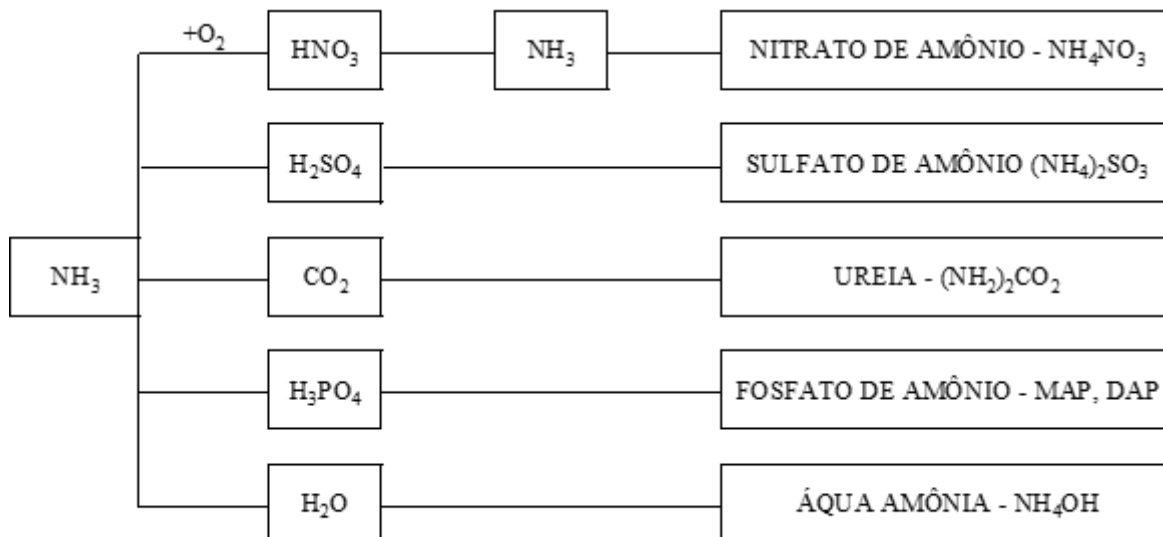


Figura 2.3 - Rota de produção de fertilizantes nitrogenados.

Fonte: FERTIPAR, adaptado de Dias (2006).

A Tabela 2.3 apresenta as características dos principais fertilizantes nitrogenados comercializados no Brasil, em que a participação percentual do nitrogênio aparece em diferentes tipos de radicais químicos, como nitrato ( $\text{NO}_3$ ), amônia ( $\text{NH}_4^+$ ) e ureia ( $\text{OC}(\text{NH}_2)_2$ ).

Tabela 2.3 - Características químicas dos principais fertilizantes nitrogenados comercializados no Brasil.

Matéria-Prima	% N total	% N- $\text{NO}_3$	% N- $\text{NH}_4$	% N- ORG.	% S
Amônia Anidra	82			82	
Ureia	45				45
Sulfato de Amônio	20			20	
Nitrato de Amônio	34	16	16		
MAP <sup>a</sup>	9			9	
DAP <sup>b</sup>	17			17	

Fonte: FERTIPAR, adaptado de Dias (2006).

<sup>a</sup>MAP – Mono-amônio fosfato

<sup>b</sup>DAP – Di-amônio fosfato

Os processos para obtenção do gás de síntese para produção de amônia são, principalmente, aqueles utilizados para obtenção de hidrogênio. Não são conhecidos avanços

recentes, de grande relevância, nessa tecnologia. As rotas comerciais mais importantes para a produção do gás de síntese puro para a fabricação de amônia anidra são antigas.

A fabricação de fertilizantes nitrogenados ocorre, no Brasil, apenas nas fábricas de Fertilizantes Nitrogenados (Fafen), em Laranjeiras (SE) e Camaçari (BA), e na Ultrafertil, em Cubatão (SP) e Araucária (PR). As importações, da ordem de 55%, para cobrir o déficit nacional, procedem, principalmente, da Rússia e da Ucrânia (DIAS e FERNANDES, 2006).

No caso dos fertilizantes nitrogenados, a volatilidade de preços e a pequena disponibilidade de gás natural no país têm dificultado a expansão da sua indústria. De fato, os preços crescentes do gás natural boliviano vêm desestimulando investimentos no setor de amônia e ureia. A demanda acaba sendo atendida por importações, que contam até com linhas internacionais de financiamento de longo prazo (FRANCO, 2007).

#### **2.4.2 Fertilizantes Potássicos**

As reservas de sais de potássio encontram-se difundidas por todas as regiões do mundo. As principais são as da Ucrânia (50%), do Canadá (27%), do Reino Unido (11%), da Bielorrússia (5%), da Alemanha (4%), do Brasil (2%) e dos Estados Unidos (1%) (NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2009). Israel e Jordânia retiram sais de potássio do Mar Morto. No Brasil, a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) é a única empresa que produz potássio no país, em Taquari/Vassouras (SE). Em 2005, a CVRD produziu 640 mil toneladas e o Brasil gastou R\$ 959 milhões com a importação de cerca de cinco milhões de toneladas de cloreto de potássio, o que representa 90% da demanda nacional. Um pouco mais recentemente, os depósitos de potássio do país se resumem à mina explorada pela Vale do Rio Doce, estimados em trezentos milhões de toneladas de cloreto de potássio, e reservas amazônicas, de cerca de novecentos milhões de toneladas (MELAMED et al., 2009).

Os depósitos potássicos, para se tornarem fertilizantes, precisam ser beneficiados até a obtenção de produtos de mais alta concentração e solúveis em água. No entanto, ao contrário dos fertilizantes fosfatados, não requerem processos por tratamento com calor ou ácidos fortes para obtenção de produtos disponíveis para as plantas (DIAS, 2006).

O potássio encontra-se em porcentagens elevadas em minerais como silvita, silvinita, carnalita e langbeinita. Por meio desses, pode-se chegar aos diversos fertilizantes potássicos

existentes. Pela sua alta concentração e baixo custo, a maior parte do potássio utilizado na agricultura mundial está na forma de cloreto de potássio. Para diminuir a dependência nacional do potássio utilizado na agricultura, pesquisadores de várias instituições do país vêm buscando opções para obtenção desse elemento com base em minerais contidos em rochas brasileiras. Os resultados mais satisfatórios até o momento têm sido encontrados pela moagem de rochas silicáticas que contêm o mineral flogopita (DIAS, 2006).

A composição dos principais fertilizantes potássicos comercializados no Brasil pode ser observada na Tabela 2.4, listados de forma decrescente do teor de potássio, considerando o seu óxido,  $K_2O$ .

Tabela 2.4 - Composição química dos principais fertilizantes potássicos comercializados no Brasil.

<b>Produto</b>	<b>%<math>K_2O</math></b>	<b>%S</b>	<b>% Mg</b>	<b>% Cloro</b>	<b>%N</b>
Cloreto de Potássio	58			45	
Sulfato de Potássio	48	15	0-1,2	0,5-2,5	
Nitrato de Potássio	44				12
Sulfato de Potássio e Magnésio	20	20	10	1	

Fonte: FERTIPAR, adaptado de Dias (2006).

Os potássicos provêm do beneficiamento de depósitos subterrâneos, na maioria das vezes, a centenas de metros de profundidade, rochas potássicas do tipo evaporito, mistura de silvita,  $KCl$ , e halita,  $NaCl$ , conhecida como silvinita. A tecnologia corrente envolve um processo de dissolução sob pressão a quente e recristalização por resfriamento e redução de pressão (LUZ, 2001).

Os últimos estudos para o desenvolvimento de uma usina de beneficiamento no país foram realizados há mais de 15 anos. Há projeto de pesquisa tecnológica para viabilização dos depósitos de rocha carnalítica por processo de definição da CVRD. Também se encontra pendente a definição do projeto potássio de Fazendinha e Arari, no Estado do Amazonas, em que a Petrobras é a atual detentora das concessões de lavra (LUZ, 2001).

Pesquisadores de várias instituições vêm buscando alternativas para obtenção de potássio com base em minerais contidos em rochas brasileiras. Os estudos estão sendo feitos com recursos dos Fundos Setoriais do Agronegócio e Mineral, do Ministério da Ciência e Tecnologia, e com o envolvimento de mais de 17 instituições de pesquisa, como a

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), a Universidade Federal da Bahia (UFBA), a Universidade de Brasília (UnB) e mais de dez unidades da Embrapa (DIAS, 2006).

### 2.4.3 Fertilizantes Fosfatados

O fósforo é encontrado na natureza como fosfatos de rocha nas jazidas que ocorrem por todo o mundo. Essas jazidas são sedimentares, geralmente derivadas da vida animal, ou ígneas (metamórficas), decorrentes da atividade eruptiva dos vulcões. As maiores reservas mundiais estão em países como Marrocos (60%), China (15%), Estados Unidos (4%), África do Sul (4%) e Jordânia (2%), que detêm 85% das 56 milhões de toneladas das reservas da rocha. Os três maiores produtores mundiais são os Estados Unidos, a Rússia e o Marrocos. O Brasil é o sétimo produtor mundial de fosfato e tem as maiores jazidas nos Estados de Minas Gerais (73,8%), Goiás (8,3%) e São Paulo (7,3%), junto às regiões próximas das cidades de Catalão (GO), Tapira (MG), Araxá (MG) e Jacupiranga (SP) (DIAS, 2006).

Rocha fosfática e enxofre são as matérias-primas básicas para a produção da maior parte dos fertilizantes fosfatados solúveis comercializados no Brasil e no mundo.

De modo simplificado, a Figura 2.4 apresenta a rota de produção dos principais fertilizantes fosfatados comercializados no país.

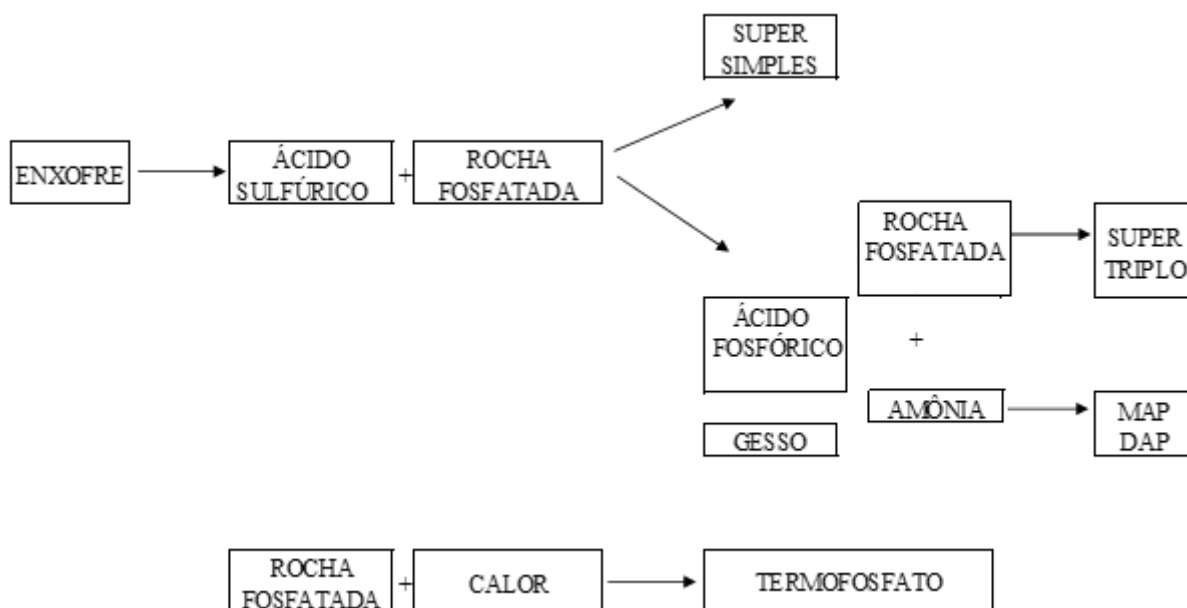


Figura 2.4 - Rota de Produção dos Principais Fertilizantes Fosfatados Produzidos no Brasil.

Fonte: FERTIPAR, adaptado de Dias (2006).

## 2.5 Utilização de Fertilizantes e o Meio Ambiente

A cadeia de produção dos fertilizantes NPK é responsável por 1,2% do consumo de energia e de equivalente emissão antrópica global de gases do efeito estufa, distribuindo-se em 92,5% para N, 3% para  $P_2O_5$  e 4,5% para  $K_2O$ . Quanto aos gases do efeito estufa, calculam-se as emissões globais do setor em 283 milhões de toneladas de  $CO_2$  equivalentes, das quais 134 milhões como gases de chaminé, 75 milhões como  $CO_2$  puro, e 74 milhões como óxido nitroso resultante principalmente da produção de ácido nítrico (DIAS & LAJOLO, 2009).

Os fertilizantes nitrogenados, por exemplo, estão entre os mais utilizados e são os que causam maior impacto ambiental. A produção desses compostos é responsável por 94% do consumo de energia de toda produção de fertilizantes. Os principais combustíveis utilizados são o gás natural (73%) e o carvão mineral (27%), ambos fósseis, cujas emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) contribuem com o processo de desequilíbrio do efeito estufa, favorecendo o processo de aquecimento global. A fabricação consome aproximadamente 5% da produção anual de gás natural (IFA, 2016).

Além disso, o potencial de aquecimento global do  $N_2O$  é 298 vezes maior que o de  $CO_2$ , baseado em um período de 100 anos (RAMASWAMY et al., 2007). Diante disso, pequenas quantidades provenientes da aplicação de fertilizantes em processos agrícolas podem representar um significativo impacto ambiental na cadeia de biocombustíveis (LARSON, 2006).

As emissões de óxido nitroso são resultado dos processos de nitrificação e desnitrificação<sup>3</sup> do nitrogênio aplicado e são intensificadas quando a quantidade aplicada é maior do que a requerida pela planta (LARA CABEZAS et al., 2000; SCIVITTARO et al., 2000; GALLOWAY et al., 2004). Essas emissões podem ocorrer de duas maneiras: (a) diretamente, pela emissão de  $N_2O$  do solo para a atmosfera; e (b) indiretamente, incluindo o  $N_2O$  produzido em águas subterrâneas e superficiais; o nitrogênio lixiviado pelo solo e emissões de  $NH_3$ ; e  $NO_x$  dos solos cultivados (IPCC, 2006).

As emissões de óxido nitroso são as maiores fontes de GEEs na agricultura, sendo 38% das emissões agrícolas representadas por  $N_2O$  (US-EPA, 2006 apud IPCC, 2007). Essas

---

<sup>3</sup> Nitrificação é um processo biológico que ocorre no solo por meio de bactérias que convertem amônio em nitrito ( $NO_2^-$ ) e depois em nitrato ( $NO_3^-$ ),  $N_2O$  é gerado como coproduto da reação. Desnitrificação é uma reação em que o nitrato é convertido em nitrogênio gasoso ( $N_2$ ) por bactérias heterotróficas (MEURER, 2006).

emissões representaram 58% das emissões antropogênicas totais de óxido nitroso (IPCC, 2007).

Segundo a Diretiva Européia, a partir dos estudos realizados em JRC (2008), a etapa de cultivo de distintas biomassas foi a que mais contribuiu, com 30 – 70 % das emissões globais de GEEs, em função do modo de produção; o processamento industrial foi responsável por 25 – 60 %; e o restante das emissões relacionadas ao transporte e distribuição, situam-se, em geral, entre 2 – 20 % (EC, 2010). Ainda de acordo com o mesmo estudo, os principais componentes da etapa de cultivo de biomassa são as emissões provenientes das máquinas, produção de fertilizantes e as emissões de  $N_2O$  do solo, sendo que estas últimas representam 40 – 70 % das emissões de toda a etapa (em certos casos, ainda mais), em função do modo de produção (EC, 2010).

Comparados com os processos produtivos de nitrogênio, os de rocha fosfática são muito menos impactantes, mas apresentam possibilidades expressivas de redução do consumo energético e da emissão por tonelada de produto. O minério bruto, como a rocha fosfática nos fertilizantes fosfatados, requer, por razões de economicidade, que as plantas de beneficiamento se localizem sempre o mais próximo possível das jazidas minerais, em locais onde raramente há disponibilidade de energia. Trata-se de beneficiar minério que tem cerca de 10% de teor de  $P_2O_5$  e reconvertê-lo em concentrado fosfático com cerca de 35%, transportando-o só então para o complexo químico, a etapa posterior, diminuindo sensivelmente os custos de transporte. Por esta razão, quase todos os empreendimentos de mineração de rocha fosfática requerem a instalação de linhas de transmissão de energia elétrica, às quais estão associados numerosos impactos ambientais (DIAS & LAJOLO, 2009; LAPIDO-LOUREIRO, 2008).

Mais adiante na cadeia produtiva, quanto ao produto final fertilizante, este, ao ser colocado pelo agricultor no solo, provoca a poluição dos cursos d'água pelo escoamento superficial e erosão dos solos adubados, devido ao fosfato aderido às partículas de solo arrastadas para dentro do curso d'água (CHAVES, 2009).

O fósforo também está frequentemente associado à eutrofização das águas superficiais, no entanto, tem havido poucos relatos de excesso de fósforo nas lavouras de cana-de-açúcar no Brasil, pois os solos tropicais geralmente carecem deste nutriente e apresentam grande capacidade de adsorção e retenção. A contaminação da água superficial nestes solos é principalmente devido à erosão de escoamento, uma vez que o fósforo não se move em profundidade. O transporte de fósforo resultando em perda de escoamento é incomum porque

P é aplicado principalmente nos sulcos de plantio e pouco usado em soqueiras, onde a aplicação é feita em superfície. Além disso, as práticas de conservação do solo geralmente utilizadas em plantações de cana-de-açúcar são relativamente eficientes para evitar o fluxo laminar. No entanto, nas planícies e planícies de inundação na Flórida, EUA, por exemplo, a eutrofização tem sido associada com P aplicado aos campos de cana-de-açúcar (HARTEMINK, 2008).

Ressalta-se também os estudos de balanço energético, que estabelecem a relação entre o total de energia contida no biocombustível e o total de energia fóssil investida em todo o processo da sua produção, incluindo-se o processo agrícola e industrial. Somente culturas de alta produção de biomassa e com baixa adubação nitrogenada, como a cana-de-açúcar e dendê, têm apresentado balanços energéticos altamente positivos (média de 8,7) (URQUIAGA, ALVES & BODDEY, 2005). A Tabela 2.5 mostra os ingressos de energia fóssil necessários e o resultante balanço energético da produção de etanol derivado da cultura, destaca-se o maior valor de ingresso de energia fóssil representado pelos itens de fertilizantes e pesticidas.

Tabela 2.5 - Balanço energético para a produção de etanol de cana-de-açúcar sob condições brasileiras.

	<b>ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup></b>
Rendimento (colmos de cana)	84,0 MG
Produção de etanol	7.224 L
<b>Entradas de Energia Fóssil</b>	<b>GJ</b>
Máquinas agrícolas e transporte à usina	5,62
Fertilizantes e Pesticidas	<b>7,23</b>
Mudas e toletes	0,48
Equipamentos e prédios	6,03
Insumos na usina	0,62
<b>Total</b>	<b>19,98 GJ</b>
<b>Energia produzida no etanol</b>	<b>161,10 GJ</b>
<b>Balanço Energético (energia no biocombustível / energia fóssil investida)</b>	<b>8,06</b>

Fonte: Urquiaga, Alves e Boddey, 2005.

Neste mesmo sentido, são apresentadas as diferenças nos resultados finais de emissões de GEEs do ciclo de vida do etanol brasileiro de acordo com autores distintos (Tabela 2.6). Segundo Chehebe (1998), a análise do ciclo de vida é uma técnica para avaliação dos aspectos

ambientais e dos impactos potenciais associados a um produto, compreendendo etapas que vão desde a retirada da natureza das matérias primas que entram no sistema produtivo (berço) até a disposição do produto final (túmulo).

Tabela 2.6 - Comparação entre os resultados finais de emissões de GEEs no ciclo de vida do etanol brasileiro.

Autores	Emissões Totais (gCO <sub>2</sub> eq/MJ)
Macedo, Seabra e Silva (2008)	19,49
Ometto, Hauschild e Roma (2009)	13,1
Soares et al. (2009)	22,26
Diretiva Européia (JRC, 2008)	24,3

Fonte: Grisoli, 2011.

Essas diferenças nos resultados finais se dão de acordo com as premissas e valores de inventário utilizados. O manejo da cultura de cana-de-açúcar pode variar entre as diversas usinas brasileira, sendo que a maioria dos estudos se utiliza de dados para simulação em uma usina padrão, o que pode refletir nos resultados (GRISOLI, 2011). Além disso, a autora identificou que as maiores emissões de GEEs e principais diferenças entre os valores estabelecidos nos estudos se dá na fase agrícola de produção de cana-de-açúcar.

A ACV é uma das técnicas com o propósito de desenvolver o levantamento de informações que permitam compreender e consequentemente diminuir os impactos potenciais causados por um produto. As categorias gerais de impactos ambientais que necessitam ser consideradas incluem o uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas, (ABNT ISO 14040, 2001).

O objetivo das análises do ciclo de vida de combustíveis tem sido a realização dos balanços de energia e de emissões dos gases de efeito estufa, como apresentado nos parágrafos anteriores. O balanço energético pode ser expresso pela razão entre a energia contida no combustível fabricado e a energia fóssil necessária para a produção do combustível. Já o balanço de emissões de gases de efeito estufa permite a estimativa das emissões em todas as etapas consideradas na análise do ciclo de produção, transporte e consumo (ABNT ISO 14040, 2001).

No caso dos biocombustíveis, as emissões de GEE no processo produtivo não estão exclusivamente relacionadas ao uso de energia (de diferentes fontes), pois uma parcela significativa dessas emissões está associada ao cultivo e às mudanças do uso da terra (DELUCCHI, 2006).

## 2.6 Eficiência dos Fertilizantes Minerais

Segundo ANDA (2000), o sucesso de uma adubação depende de muitos fatores, direta ou indiretamente relacionados à essa prática. Como fatores diretos, podem ser citados:

- **Qualidade dos fertilizantes:** as características apresentadas pelos fertilizantes que têm relação com a sua qualidade. Algumas características são de âmbito geral, isto é, dizem respeito à qualidade de qualquer produto, como, por exemplo, consistência dos grânulos, segregação, fluidez, higroscopicidade, empedramento. Outras, porém, dependem da situação agrícola em que o produto vai ser utilizado, como por exemplo, estado físico, número, forma química e concentração de nutrientes e solubilidade.
- **Solo:** as características físicas, químicas, físico-químicas e biológicas do solo influem de maneira decisiva na eficiência dos adubos. As características físicas como textura, estrutura e porosidade são fatores determinantes para o armazenamento, mobilidade e, principalmente, perdas de fertilizantes adicionados pelas adubações, perdas essas que podem ser por lixiviação ou lavagem dos nutrientes, ou erosão. As características químicas estão relacionadas com a natureza dos minerais do solo e a disponibilidade de nutrientes presentes no solo, subsidio esse fundamental para a recomendação da dose de adubação, assim como as transformações a que os nutrientes adicionados ao solo estarão sujeitos. As características físico-químicas dizem respeito, principalmente, à capacidade de troca ou retenção de cátions e ao pH. A primeira reflete a capacidade de armazenamento de nutrientes catiônicos pelo solo, além da qual esses nutrientes ficam mais sujeitos à lixiviação. O pH, que é um índice que indica o grau de acidez do solo, é de extrema importância, porque determina a disponibilidade dos nutrientes contidos no solo ou a ele adicionados (Figura 2.5) e também a assimilação dos nutrientes pelas plantas. Considerando-se que a maioria dos solos brasileiros apresentam acidez média a alta, a sua correção, ou seja, a calagem, é um fator decisivo na eficiência das adubações, a adubação do solo ácido representa desperdício de fertilizante.

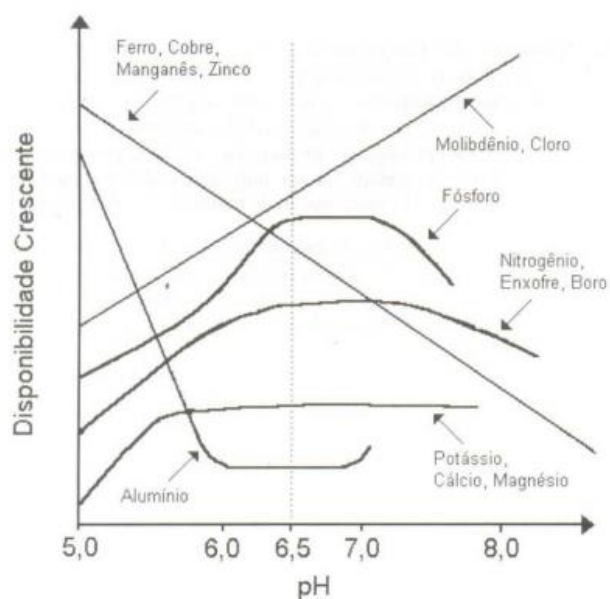


Figura 2.5 - Efeito do pH na disponibilidade dos nutrientes.

Fonte: Malavolta, 1981.

- Recomendação equilibrada, qualitativa e quantitativa: na prática da adubação é amplamente conhecida pela famosa “lei do mínimo” de Liebig, isto é, a produção fica limitada pelo nutriente que se encontra em menor disponibilidade. Essa lei pode ser entendida representando-a por um recipiente de bordas irregulares na altura (Figura 2.6), a capacidade do recipiente fica limitada à menor altura da borda.

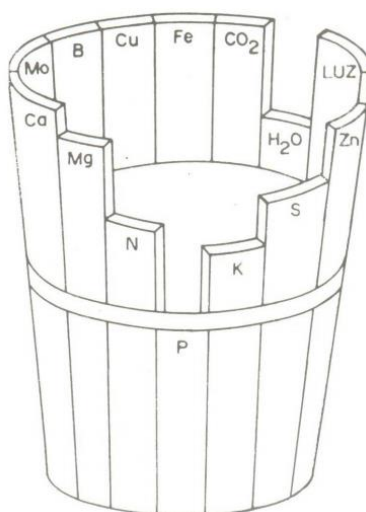


Figura 2.6 - Representação da “lei do mínimo” de Liebig.

Fonte: Alcarde et al. (1998).

- Época de aplicação: produtos de baixa solubilidade devem ser aplicados com antecedência para que possam se dissolver. Produtos solúveis deveriam ser aplicados nas fases de sua maior exigência pela cultura, uma vez que, no solo, podem ficar sujeitos a perdas. Algumas práticas como a do parcelamento, principalmente dos nitrogenados, é um fator importante na eficiência.
- Forma de aplicação ou localização: os adubos de baixa solubilidade devem ser aplicados em área total e bem incorporados ao solo, a fim de que os fatores solubilizantes possam melhor agir. Os adubos solúveis devem ser aplicados mais localizados, próximos às raízes, para diminuir as perdas.
- Uniformidade da distribuição: a dose de adubo recomendada deve ser distribuída uniformemente por toda a área, observada a forma de aplicação indicada. Isso depende da qualidade dos equipamentos aplicadores, da sua regulagem e operacionalidade corretas, mas depende também de alguns aspectos de qualidade do fertilizante, como segregação, higroscopicidade, empedramento e fluidez.

Quanto aos fatores indiretos, pode-se citar:

- Umidade do solo: as plantas só absorvem os nutrientes que estão na solução do solo. Portanto, a presença de água é fundamental, quer proveniente de chuvas ou de irrigação. Em solo seco a eficiência dos fertilizantes é altamente prejudicada. Por outro lado, o excesso de água também é maléfico, porque acentua a perda por lixiviação.
- Planta: as diferentes espécies de plantas respondem diferentemente ao efeito dos fertilizantes. Mas dentro de uma mesma espécie há variedades com maior capacidade de aproveitamento dos fertilizantes, sendo, portanto, mais responsivas ao efeito dos adubos e, conseqüentemente, mais produtivas.
- Outros: a eficiência dos fertilizantes está também sujeita a uma série de outros fatores indiretos, como preparo adequado do solo, espaçamento, combate às ervas daninhas, pragas e moléstias, fatores esses que dificultam ou impedem a plenitude da ação dos fertilizantes e, conseqüentemente, o seu aproveitamento pelas plantas.

Além disso, novas técnicas de produção agrícola também devem ser consideradas, como por exemplo, a palhada deixada no solo e conseqüente cultivo mínimo. Segundo Cantarella et al. (2002) a médio e longo prazo, o solo pode acumular C e N orgânico quando a cana-de-

açúcar é manejada sem despalha a fogo, mas, em curto prazo, o aporte de resíduos com alta relação C:N pode fazer aumentar a demanda por N mineral, concomitante a isso, segundo Weir et al. (1998) a menor evaporação de água, devido a cobertura vegetal, pode favorecer as perdas por lixiviação e por desnitrificação.

Ainda, novas tecnologias de produção de fertilizantes devem ser consideradas, como os fertilizantes de liberação lenta/controlada, conhecidos por serem encapsulados/recobertos ou com baixa solubilidade. Os fertilizantes encapsulados são granulados e os grânulos recobertos principalmente por polímeros, estes podem ser: polietileno de baixa permeabilidade misturado com um polímero de alta permeabilidade (etileno-acetato de vinila) (GANDEZA, 1991), polímeros biodegradáveis, enxofre /polímero (TRENKEL, 2010) entre outros.

No entanto, este trabalho buscou apresentar apenas como alternativa para redução do uso de fertilizantes minerais na produção de cana-de-açúcar a utilização de fertilizantes orgânicos advindos de resíduos do processamento da própria matéria-prima, como a vinhaça e a torta de filtro.

### **2.6.1 Utilização da Vinhaça como Fertilizante Orgânico**

A vinhaça é o subproduto da fabricação do etanol, sendo composta, em sua maioria, de água (97%). A fração sólida é constituída principalmente de matéria orgânica e elementos minerais, e o K representa cerca de 20% dos elementos presentes e constitui o elemento limitante para a definição da dose a ser aplicada nos solos (MARQUES, 2006).

A composição química da vinhaça é bastante variável, dependendo principalmente da composição do vinho submetido à destilação, o qual, por sua vez, está relacionado com outros fatores, tais como: natureza e composição da matéria-prima, sistema usado no preparo do mosto, método de fermentação adotado, sistema de condução da fermentação alcoólica, raça da levedura utilizada, tipo de aparelho destilatório empregado e modo de destilação adotado (ALMEIDA, 1952).

Comparada com o bagaço e a torta de filtro, outros resíduos orgânicos produzidos pela indústria sucroenergética, a vinhaça é mais rica em nutrientes, principalmente potássio, além de cálcio, magnésio, fósforo, manganês e nitrogênio orgânico. Sua relação C/N é igual a 15, o que a caracteriza como um material rico em proteínas (CERRI et al., 1988).

Elias Neto (1988) classificou a vinhaça, de acordo com três origens possíveis, conforme o tipo de mosto:

- Vinhaça de mosto de caldo: produzida de caldo direto para a fermentação alcoólica, normalmente em destilarias autônomas;
- Vinhaça de mosto de melaço: mosto preparado com melaço, subproduto da produção de açúcar, normalmente em destilarias anexas;
- Vinhaça de mosto misto: mosto preparado com caldo direto e melaço, normalmente em destilarias anexas.

As principais características da vinhaça estão apresentadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Características da vinhaça da cana-de-açúcar.

<b>Parâmetro</b>	<b>Matéria-Prima para Etanol</b>		
	<b>Melaço</b>	<b>Caldo</b>	<b>Mistura</b>
pH	4,2-5,0	3,7-4,6	4,4-4,6
Temperatura (°C)	80-100	80-100	80-100
DBO (mg/L O <sub>2</sub> )	25.000	6.000-16.500	19.800
DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	65.000	15.000-33.000	45.000
Sólidos totais (mg/l)	81.500	23.700	52.700
Material volátil (mg/l)	60.000	20.000	40.000
Material fixo (mg/l)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg/l N)	450-1.600	150-700	480-710
Fósforo (mg/l P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	100-290	10-210	9-200
Potássio (mg/l K <sub>2</sub> O)	3.740-7.830	1.200-2.100	3.340-4.600
Cálcio (mg/l CaO)	450-5.180	130-1.540	1.330-4.570
Magnésio (mg/l MgO)	420-1.520	200-490	580-700
Sulfato (mg/l SO <sub>4</sub> )	6.400	600-760	3.700-3.730
Carbono (mg/l C)	11.200-22.900	5.700-13.400	8.700-12.100
Relação C/N	16-16,27	19,7-21,07	16,4-16,43
Material Orgânico (mg/l)	63.400	19.500	38.000
Outras substâncias (mg/l)	9.500	7.900	8.300

\*DBO: Demanda bioquímica de oxigênio.

\*\*DQO: Demanda química de oxigênio.

Fonte: Marques, 2006.

A aplicação de vinhaça nos solos é conhecida como fertirrigação, processo conjunto de irrigação e adubação que consiste na utilização da própria água para conduzir e distribuir o fertilizante mineral ou orgânico na lavoura, podendo ser feita por qualquer sistema de irrigação (VIEIRA, 1986). Dentro deste contexto, o termo fertirrigação, no que concerne a

vinhaça não é todo correto, pois se refere mais ao método de irrigação empregado, não se constituindo mais do que um processo de aplicação de fertilizante e molhamento, sem controle prático da lâmina hídrica aplicada e muito menos da frequência das aplicações, interessando mais a quantidade de potássio carregada e transferida para o solo (FREIRE & CORTEZ, 2000).

Porém, segundo a COPERSUCAR (1978), a vinhaça utilizada como fertilizante permite alcançar o objetivo de não poluir o ambiente, uma vez que todo resíduo formado é devolvido à cultura. Podendo assim substituir parte da adubação mineral, diminuindo custos.

A necessidade da adubação das soqueiras de cana-de-açúcar é indiscutível, tendo em vista que, em cada ciclo, a planta retira do solo quantidades apreciáveis de nutrientes, que necessitam ser restituídos através da adubação. A vinhaça tem possibilidades de fornecer parte desses nutrientes requeridos pela soqueira, onde seu emprego deve ser prioritário, pelo fato de sua disponibilidade ocorrer no período da safra (SANTANA, 1985). Segundo Ripoli et. al (2007), a vinhaça é empregada principalmente em cana-soca, fornecendo todo o  $K_2O$ , necessitando apenas de complemento do N, o qual pode ser feito com aplicação de ureia, por exemplo.

Penatti et al. (1988) citam que o uso de vinhaça traz resultados positivos na produtividade agrícola da cana, além de gerar economia com a aquisição de fertilizantes. Além disso, a vinhaça proporciona benefícios biológicos, físicos e químicos ao solo, refletindo em maiores produtividades (FREIRE & CORTEZ, 2000).

O uso desse resíduo na lavoura já é uma realidade nos dias atuais, a grande questão é identificar qual o processo de aplicação é mais eficiente em termos de custos e danos ambientais. Matioli e Menezes (1984) e Matioli et al. (1988) dedicaram-se ao estudo de otimização dos sistemas de aplicação de resíduos líquidos na lavoura canavieira, destacando a necessidade de se elaborar projetos fundamentados em critérios técnico-econômicos, visando ao máximo aproveitamento do potencial nutricional da vinhaça e o enquadramento dos sistemas de aplicação dentro das exigências dos órgãos responsáveis pelo controle de poluição do meio-ambiente.

Ao ser aplicada no campo a vinhaça bruta ou “*in natura*” (VN) provoca modificações nas características físicas e químicas do solo, principalmente no pH, CTC, Carbono orgânico, retenção de água, condutividade elétrica, porosidade, afetando também a população e a atividade de microrganismos do solo (COPERSUCAR, 1978, GLÓRIA, 1997, LEAL et al., 1983; MENDOZA et al., 2000).

Nesse sentido, em abril de 2005 a CETESB publicou a portaria nº 01/05, reeditada em dezembro de 2006, através da Norma Técnica P4.231, definindo critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação de vinhaça no solo do Estado de São Paulo. Nesta regulamentação foi estabelecida a obrigatoriedade de apresentação de um “Plano de Aplicação de Vinhaça”, até o dia 02 de abril de cada ano, contendo mapas com a identificação das áreas de aplicação, canais, tanques, dados sobre o solo, formas e dosagens de aplicação, além da caracterização química da vinhaça a ser utilizada (CETESB, 2006). A dose máxima de vinhaça definida pela referida portaria da CETESB é:

$$m^3 \text{ de vinhaça/ha} = [(0,05 \times CTC_{\text{efetiva}} - ks) \times 3744 + 185] / kvi,$$

Onde:

$0,05 = 5\%$  da CTC;

CTC = capacidade de troca catiônica (cmolc/dm<sup>3</sup>);

Ks = concentração de potássio no solo (cmolc/dm<sup>3</sup>);

3744 = constante – cmolc/dm<sup>3</sup> para kg de potássio em um volume de 1 ha por 0,8 metros de profundidade;

185 = massa, em kg, de K<sub>2</sub>O extraído pela cultura por ha, por corte;

Kvi = concentração de potássio na vinhaça em kg de K<sub>2</sub>O m<sup>3</sup>.

Uma tecnologia que vem sendo empregada é a vinhaça concentrada, que viabiliza a aplicação em cultivos localizados até distâncias médias de 90 km, sendo demonstrado que sua aplicação na dose equivalente a 180 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O com complementação nitrogenada e 270 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O sem complementação nitrogenada, poderia substituir com vantagem a adubação mineral (BARBOSA et al., 2006).

As vantagens da concentração da vinhaça visando sua aplicação ao solo são: a maior estabilidade do produto e a redução do volume a ser transportado, e este é o fator responsável pela amortização dos investimentos necessários ao transporte do produto, da destilaria à plantação (SENA, 1998).

### 2.6.2 Utilização da Torta de Filtro como Fertilizante Orgânico

A torta de filtro é um resíduo gerado durante o processo industrial para a fabricação do açúcar, composto pela mistura de bagaço moído e lodo da decantação, mais especificamente na etapa denominada de clarificação do caldo da moenda. O processo de adição do hidróxido de cálcio ao caldo aquecido origina floculação de coloides orgânicos, precipitados de sais de cálcio e fosfatos. Essa suspensão é mantida em repouso, resultando em um caldo límpido e um precipitado constituído por compostos orgânicos e inorgânicos que foram insolubilizados. No precipitado formado após o repouso há grande quantidade de caldo clarificado, o qual é recuperado pelo processo de filtragem a vácuo, sendo a borra resultante da filtragem denominada de torta de filtro ou torta Oliver (NUNES JR., 2008; BUSATO, 2008), formada pelos compostos orgânicos e inorgânicos que foram insolubilizados. Esta borra é misturada com bagaço finamente moído e submetida à filtração a vácuo, resultando num material com umidade em torno de 75%. Segundo Korndörfer (2003) e Santos et al. (2010) para cada tonelada de cana-de-açúcar industrializada obtém-se aproximadamente 40 quilos de torta de filtro.

A torta de filtro pode apresentar teores de alguns nutrientes como cálcio, fósforo e enxofre, proveniente do produto utilizado na floculação de impurezas como solo e bagacilhos. Os produtos utilizados nesta etapa podem ser a cal virgem ( $\text{CaO}$ ), ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) e anidrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ), os quais contribuem com os nutrientes provenientes de sua adição (DELGADO & CÉSAR, 1990).

A concentração da torta de filtro é constituída de cerca de 1,2 a 1,8% de fósforo e cerca de 70% de umidade, que é importante para garantir a brotação da cana em plantios feitos em épocas de inverno nas Região Sul e Sudeste. A torta também apresenta alto teor de cálcio e consideráveis quantidades de micronutrientes.

Em torno de 50% do fósforo da torta pode ser considerado prontamente disponível. O restante será mineralizado mais lentamente. A torta é empregada principalmente em cana-planta, nas dosagens de 80 a 100 toneladas por hectare (torta úmida); em área total, de 15 a 35 toneladas por hectare (sulco) e 40 a 60 toneladas por hectare na entrelinha das soqueiras, substituindo parcial ou totalmente a adubação fosfatada, dependendo da dose de  $\text{P}_2\text{O}_5$  recomendada (EMBRAPA, 2016). A Tabela 2.8 apresenta a composição química aproximada da torta de filtro.

Tabela 2.8 - Composição química aproximada de 100 gramas de torta de filtro.

<b>Parâmetro</b>	<b>Quantidade</b>
Carbono	8,04%
Nitrogênio	0,28%
Fósforo Orgânico	0,53 mg
Fósforo Inorgânico	1,18 mg
Fósforo Total	1,70 mg
Potássio	56,64 mg
Carbono	0,80 g
Magnésio	76,9 mg
Matéria Orgânica	16,90%
Água Livre	77,77%
Boro	3 ppm
Cobre	11 - 15 ppm
Manganês	138 - 196 ppm
Zinco	20 - 33 ppm
Cobalto	0,3 ppm
Ferro	3.500 ppm

Fonte: Paranhos (1987) e Vitti et al. (2006).

O uso da torta de filtro no plantio de cana-de-açúcar visa à substituição plena do N e P e parcial do K. Os teores de N, P e K das tortas de filtro são muito variáveis, principalmente em função da matéria-prima e dos tratamentos industriais (uso de ácido fosfórico no tratamento do caldo, por exemplo). Os valores médios giram em torno de 1% de N, 1,5% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 0,5% de K<sub>2</sub>O. É necessário que a torta de filtro condicionada/enriquecida tenha elevados teores de nutrientes para ser aplicada em doses economicamente viáveis na substituição da adubação mineral, uma vez que normalmente se utiliza 50 a 60 kg/ha de N, 120 a 150 kg/ha P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e de 100 a 150 kg/ha K<sub>2</sub>O (RIPOLI, 2007).

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Análise dos Custos de Produção**

Para o cálculo dos custos de produção foram utilizados dados do Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas (PECEGE, 2015), vinculado ao Departamento de Economia, Sociologia e Administração da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), que realiza o Levantamento de Custos de Produção de Cana-de-açúcar, Açúcar, Etanol e Bioeletricidade no Brasil desde a safra 2007/08 em diferentes regiões do Brasil, em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). Os dados são agregados de acordo com três regiões: Centro-Sul Tradicional (SP e PR), Centro-Sul Expansão (MG, GO, MS e MT) e Nordeste (AL, PE, PB).

A metodologia utilizada considera que o custo total (custo agroindustrial) das unidades processadoras de cana-de-açúcar é composto pelo custo da matéria-prima e processamento industrial.

Tanto para a área agrícola quanto industrial os custos são segmentados em três grupos: COE, COT e CT. O “Custo Operacional Efetivo (COE)” refere-se à quantidade monetária efetivamente desembolsada nas atividades de produção diretas ao longo da safra, enquanto o “Custo Operacional Total (COT)” incorpora a esses custos as estimativas de custos de depreciações (segundo uma vida útil pré-determinada) de benfeitorias, de máquinas e equipamentos, a partir do montante de capital investido. Sendo assim, as depreciações estão alocadas, portanto, na segunda parcela da estrutura de custos, o COT. Por fim, o “Custo Total (CT)” adiciona ao COT a remuneração do capital e da terra, entendidos como custos de oportunidade. O resumo da composição dos custos pode ser observado na Figura 3.1.

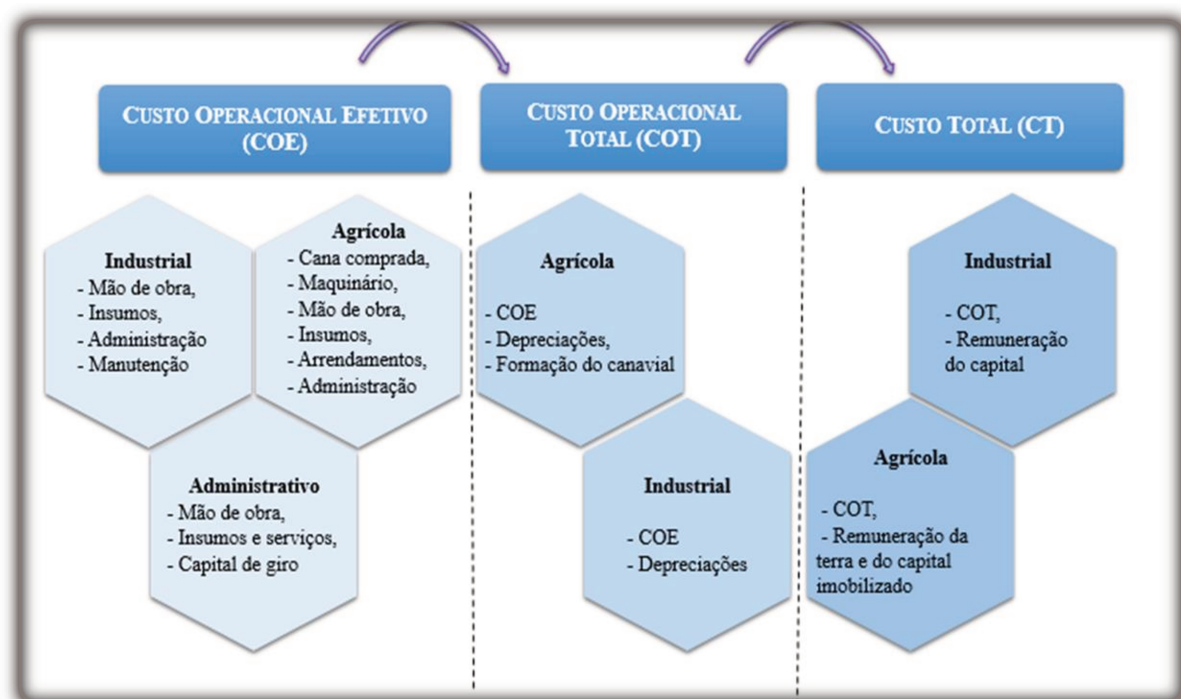


Figura 3.1 - Composição dos custos agroindustriais (COE, COT e CT).

Fonte: PECEGE, 2015.

Sob a perspectiva dos custos agrícolas, o levantamento é realizado com fornecedores de cana, com maiores detalhamentos dos custos nas etapas de produção da matéria-prima. Para determinação dos custos de produção de cana-de-açúcar dos fornecedores segue-se a metodologia de “painéis”, caracterizados por encontros presenciais, em que os participantes, em geral produtores rurais e técnicos de cooperativas, associações e sindicatos, definem de forma consensual a unidade produtiva modal da região em questão, indicando os coeficientes técnicos e econômicos pré-determinados que definem o pacote tecnológico de produção de cana.

A partir do banco de dados do PECEGE do levantamento com fornecedores, analisou-se a influência dos fertilizantes na composição dos custos totais de produção da cana-de-açúcar nas safras 2009/10 a 2015/16, considerando as regiões levantadas de Assis – SP, Catanduva – SP, Goiatuba – GO, Jacarezinho – PR, Jaú – SP, Piracicaba – SP, Porecatu – PR, Quirinópolis – GO, Sertãozinho – SP, Uberaba – MG.

Além disso, a fim de analisar as vantagens que a aplicação de vinhaça e torta de filtro podem apresentar, calculou-se o custo de produção da cana-de-açúcar considerando o painel que apresentou a maior representatividade dos custos com fertilizantes no custo de produção

(Goiatuba), na safra 2015/16, sendo o ano de referência dos cálculos o de 2015, a partir de três cenários para comparação dos custos:

- Cenário 1 – Apenas utilização de fertilizantes minerais nos processos agrícolas da produção de cana-de-açúcar.

Mantiveram-se os parâmetros originais da planilha de dados coletados com fornecedores da região: adubação com 0,37 t ha<sup>-1</sup> do fertilizante MAP na operação agrícola de plantio, 0,27 t ha<sup>-1</sup> de KCl nos tratos culturais da cana planta e 0,60 t ha<sup>-1</sup> do fertilizante de formulação 20-00-20 na adubação de cobertura nos tratos de cana soca. Ou seja, não considera a aplicação de fertilizantes orgânicos.

- Cenário 2 – Aplicação de Torta de Filtro e Vinhaça *in natura*.

Os parâmetros de entrada do modelo foram modificados avaliando a aplicação de torta de filtro na cana planta e vinhaça *in natura* na adubação de soqueira, com substituição dos fertilizantes minerais utilizados.

O sistema de aplicação considerado foi o sistema de caminhão-tanque com aspersão combinada com moto bomba.

Utilizou-se o valor de 4,00 R\$/m<sup>3</sup> para o transporte e aplicação da vinhaça (POVEDA, 2014). A dosagem média considerada foi de 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; Penatti et al. (1988), avaliando aplicação de doses de vinhaça (0, 50, 100 e 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) e nitrogênio (0, 50, 100 e 150 kg/ha) em solos Latossolo Vermelho Amarelo (arenoso) e Latossolo Roxo (argiloso), verificaram que a vinhaça proporcionou aumento significativo na produtividade de cana até a dose de 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para ambos os solos. Recomenda-se que a dose de vinhaça a ser aplicada no canavial seja definida com base no seu teor de potássio e na análise química do solo, no entanto, essas informações não estão disponíveis para a área de produção em questão.

Além disso, a aplicação de torta de filtro substituiu a aplicação de N e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no plantio antes supridos a partir da utilização do MAP. Para a cana soca, a vinhaça substitui a utilização do K<sub>2</sub>O, originalmente suprido a partir do fertilizante 20-00-20, a complementação de N foi calculada a partir dos valores que já eram fornecidos por esse mesmo fertilizante, considerando também que parte do N é fornecido pela vinhaça. O fertilizante utilizado foi a ureia, com preço de 1.452,00 R\$/t - média de

valores disponibilizados pela CONAB (2016), para os meses do ano de 2015, incluindo frete.

A quantidade de  $K_2O$  foi mantida a partir do valor de  $KCl$  informado em tratos de cana planta fornecido na planilha original, porém o valor foi corrido considerando que a torta de filtro possui 0,5% de  $K_2O$ .

Os valores utilizados para cálculo do custo de aplicação de torta de filtro se basearam em respostas de fornecedores que já utilizam o resíduo no canavial, na etapa de plantio, sendo considerado um trator de médio porte para aplicação, com consumo de combustível de  $6 \text{ l h}^{-1}$  e capacidade operacional de  $1,66 \text{ h ha}^{-1}$ , parâmetros de entrada na planilha necessários para cálculo dos dispêndios com a operação, o que resultou em um custo de R\$59,35 /ha.

- Cenário 3 – Aplicação de Torta de Filtro e Vinhaça Concentrada.

Os parâmetros de entrada do modelo foram modificados avaliando a aplicação de torta de filtro na cana planta e vinhaça concentrada na adubação de soqueira, com substituição dos fertilizantes minerais utilizados, assim como no Cenário 2.

O custo de transporte e aplicação considerados seguiram valores de referência encontrados na literatura, conforme Figura 3.2.

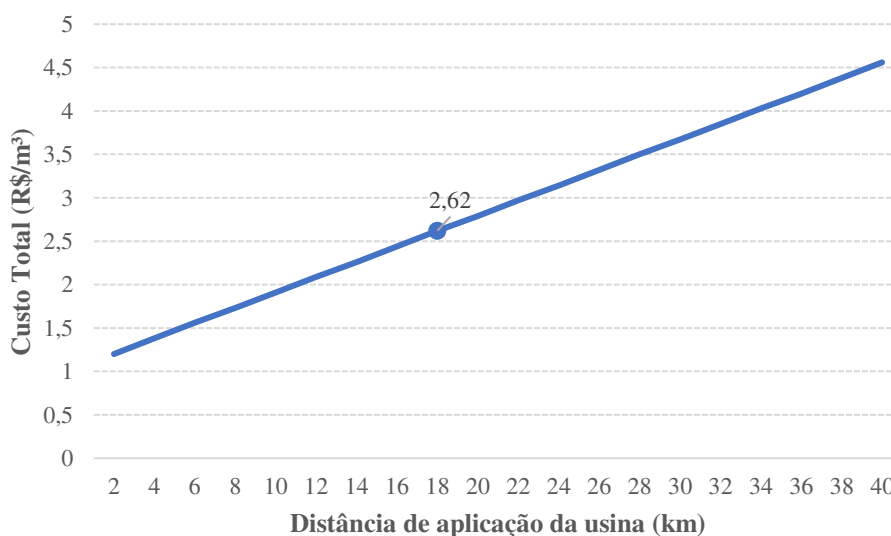


Figura 3.2 - Custo de transporte e aplicação de vinhaça concentrada.

Fonte: Veronez Projetos e Consultoria, Apud Cruz (2011).

O raio médio informado para o painel de Goiatuba foi de 18 km; dessa forma, utilizou-se o valor de 2,62 R\$/m<sup>3</sup> para o transporte e aplicação da vinhaça. A dosagem média considerada foi de 19 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, conforme valores calculados por Poveda (2014), em dosagem equivalente a uma lâmina de 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> da vinhaça *in natura* (uma dose de 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> com V<sub>4°Brix</sub> é equivalente a 19 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> com V<sub>20°Brix</sub> depois da concentração).

Da mesma forma, a complementação de N foi calculada a partir dos valores de 20-00-20 que já eram utilizados na cana soca, tendo sido utilizado o preço do fertilizante ureia de 1.452,00 R\$/t - média de valores disponibilizados pela CONAB (2016), para os meses do ano de 2015, incluindo frete.

Os parâmetros quanto ao transporte e aplicação de torta de filtro foram mantidos, conforme descrição do Cenário 2.

Após cálculo dos custos agrícolas a partir da planilha do painel Goiatuba, o aumento ou redução de custos em R\$/ha nas operações de formação e tratos de cana soca dos diferentes cenários foram considerados na planilha de coleta de dados aplicada para usinas. A planilha de coleta de custos de produção de uma usina não disponibiliza em detalhes as operações agrícolas e os insumos, são custos “fechados” das operações, por isso o cálculo para chegar no custo final de etanol teve que considerar as variações percebidas nos cálculos realizados na planilha de painel.

Em resumo, o cenário com aplicação de apenas fertilizantes minerais representa um aumento de custos em R\$/ha na formação e nos tratos de cana soca, as quais foram aplicadas nos custos da cana própria da agroindústria, para o cenário com aplicação de vinhaça e torta mantiveram-se os custos originais da planilha da usina, pois esta já considerava tais aplicações. Já o cenário com aplicação de vinhaça concentrada e torta representa uma diminuição de custos, a qual também foi aplicada nos processos de formação e tratos de cana soca nos custos com matéria-prima da usina.

O resumo dos cenários propostos para análise do desempenho econômico do etanol pode ser observado na Figura 3.3.

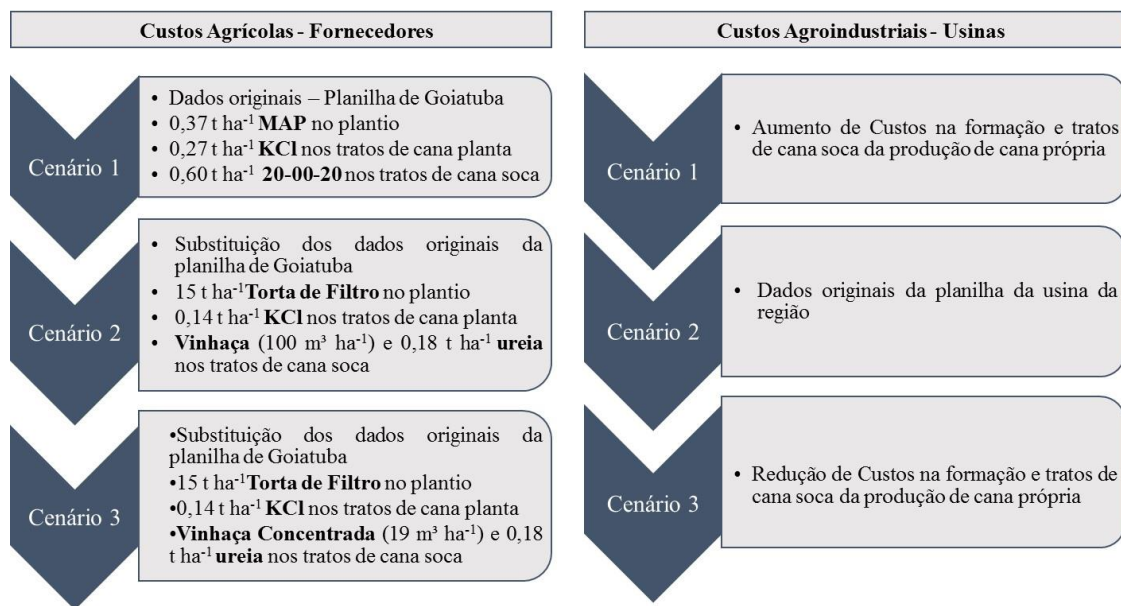


Figura 3.3 - Resumo dos cenários para análise de impactos econômicos.

Fonte: Elaboração Própria.

Os parâmetros da usina considerada encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros da usina da região de Goiatuba utilizada para avaliação dos cenários.

Parâmetros	
Produtividade (t ha <sup>-1</sup> )	83,54
Área Própria Total (ha)	30.223,00
Área de Soqueira (ha)	19.307,00
Área de Cana Planta (ha)	5.382,00
Área Fertirrigada	10.622,00
Cana Própria (t)	2.062.503,16
Cana de Terceiros (t)	1.086.557,72
Mix Açúcar (%)	49,47
Mix Etanol (%)	50,53
Quantidade de Vinhaça Gerada (m <sup>3</sup> )	1.300.246,91

Fonte: Elaboração Própria.

### 3.2 Análise dos Impactos Ambientais

Para a análise de impactos ambientais, primeiramente foram calculadas as diferenças de consumo de diesel nas operações que envolvem o transporte e aplicação de fertilizantes NPK para os cenários propostos.

- Cenário 1 – Apenas utilização de fertilizantes minerais nos processos agrícolas da produção de cana-de-açúcar;

Da planilha originalmente preenchida para a região, os valores registrados foram de um consumo de combustível de 19,4 L h<sup>-1</sup> e uma capacidade operacional de 1 h ha<sup>-1</sup> para um trator de grande porte realizar a operação de sulcação (com concomitante aplicação do fertilizante MAP); consumo de 14 L h<sup>-1</sup> e capacidade de 0,09 h ha<sup>-1</sup> para um trator de médio porte realizar a aplicação de fertilizantes nos tratos culturais da cana planta; consumo de 12 L h<sup>-1</sup> e capacidade de 0,77 h ha<sup>-1</sup> para um trator de médio porte realizar a operação de adubação de cobertura nos tratos de cana soca.

- Cenário 2 – Aplicação de Torta de Filtro e Vinhaça *in natura*;

Mantiveram-se os valores referentes à sulcação e aplicação de fertilizantes nos tratos culturais de cana planta. Foram acrescentados os valores referentes à aplicação de torta de filtro, segundo dados fornecidos por participantes dos painéis, com consumo de combustível de 6 L h<sup>-1</sup> e capacidade operacional de 1,66 h ha<sup>-1</sup>.

Para a vinhaça, o consumo de combustível foi calculado conforme fórmulas (MACEDO, 2004):

$$\text{Caminhão} + \text{motobomba} = \frac{1}{1,3} \frac{\text{L}}{\text{km}} \times \frac{36\text{km}}{60 \text{ m}^3} \times 100 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}} = 46 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 0,31 = 14,3 \frac{\text{L}}{\text{ha}}$$

Sendo que 1,3 L km<sup>-1</sup> corresponde ao consumo de combustível do caminhão-tanque com moto bomba, 36 km a distância percorrida (duas vezes o raio médio), 60 m<sup>3</sup> a capacidade do tanque e 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> a dosagem da vinhaça. O valor foi ponderado pela área de aplicação, considerada 31%.

Da mesma maneira, o consumo de combustível foi calculado para a forma de aplicação como aspersão (canal + sistema de aspersão), com a área ponderada de 69%.

$$\text{Aspersão} = 16 \frac{\text{L}}{\text{h}} \times \frac{\text{h}}{120 \text{ m}^3} \times 100 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}} = 13,33 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 0,69 = 9,2 \frac{\text{L}}{\text{ha}}$$

- Cenário 3 – Aplicação de Torta de Filtro e Vinhaça Concentrada.

Assim como no cenário 2, mantiveram-se os valores referentes à sulcação e aplicação de fertilizantes nos tratos culturais de cana planta. Foram acrescentados os valores referentes à aplicação de torta de filtro, segundo dados fornecidos por participantes dos painéis, com consumo de combustível de 6 L h<sup>-1</sup> e capacidade operacional de 1,66 h ha<sup>-1</sup>.

Para a vinhaça concentrada, o consumo de combustível foi calculado conforme fórmula:

$$\text{Caminhão} = \frac{1}{2,2} \frac{\text{L}}{\text{km}} \times \frac{36 \text{ km}}{15 \text{ m}^3} \times 19 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}} = 20,72 \frac{\text{L}}{\text{ha}}$$

Sendo que 2,2 L km<sup>-1</sup> corresponde ao consumo de combustível do caminhão-tanque para aplicação direta, 36 km a distância percorrida (duas vezes o raio médio), 15 m<sup>3</sup> a capacidade do tanque e 19 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> a dosagem da vinhaça. A área de aplicação foi considerada 100% com caminhão.

Foram avaliadas também as emissões provenientes dos fertilizantes nitrogenados minerais e orgânicos, nos três cenários. Para o cálculo, foram utilizadas as quantidades de N aplicadas por hectare, conforme composições dos fertilizantes (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Quantidades aplicadas por hectare de fertilizantes nitrogenados.

	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
<b>MAP (t ha<sup>-1</sup>)<sup>a</sup></b>	0,37	-	-
<b>20-00-20 (t ha<sup>-1</sup>)<sup>b</sup></b>	0,60	-	-
<b>Ureia (t ha<sup>-1</sup>)<sup>c</sup></b>	-	0,19	0,19
<b>Torta de Filtro (t ha<sup>-1</sup>)</b>		15,00	15,00
<b>Vinhaça (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)<sup>d</sup></b>		100,00	19,00

Fonte: Elaboração Própria.

<sup>a</sup>10% de N na fórmula

<sup>b</sup>20% de N na fórmula

<sup>c</sup>45% de N na fórmula

<sup>d</sup>0,36 kg N/m<sup>3</sup> de vinhaça

\*A lâmina de vinhaça concentrada aplicada teoricamente contém a mesma quantidade de N da vinhaça in natura.

Posteriormente, calcularam-se as emissões provenientes da aplicação desses fertilizantes conforme equações a seguir, contidas no documento da RSB (2011):

$$NH_{3\text{ mineral}} \left( \frac{\text{kg} NH_3}{\text{ha}} \right) = \text{quant. N, fertminX} \times NH_3 - N \text{ fertX} \times 17/14 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

quant N, fertmin X (kg/ha) = Quantidade de entrada de N de um fertilizante específico

NH<sub>3</sub> –N fertX (kg NH<sub>3</sub> /kg fertilizante) = fator de emissão

17/14 = fator de conversão de NH<sub>3</sub> –N para NH<sub>3</sub>.

$$NH_3 \text{ Fert Organico} \left( \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) = \text{TAN} \times \text{er} \times \text{FTV} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

TAN = Quantidade total de N (0,36 x lâmina de vinhaça aplicada)

er = fator de emissão (0,6)

FTV = Fração de TAN de N total em vinhaça (0,5)

Os parâmetros podem ser observados na Tabela 3.3 a seguir.

Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados no cálculo das emissões de NH<sub>3</sub>-N decorrentes da aplicação da vinhaça em canaviais no Brasil.

Parâmetro	Valor
Fração de TAN do N total na vinhaça [%/100]	0.5
Fator de emissão de TAN [%/100]	0.6

Fonte: Nemecek & Schnetzer, 2011.

$$NO_3 - N \left( kg \frac{N}{ha} \text{lixiviação} \right) = (N_{minfert} + N_{orgfert}) \times \text{Fraclixiviação} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

N<sub>min\_fert</sub> = kg N em fertilizante mineral

N<sub>org\_fert</sub> = kg N em fertilizante orgânico

Fraclixiviação = 0.3. Fração de todos os N adicionados / mineralizados em solos manejados em regiões onde há perda de lixiviação / escoamento, kg N / (kg de N adições)

$$N_2O = \frac{44}{28} \times (EF1 \times N_{tot}) + EF4 \times \frac{14}{17} \times NH_3 + EF5 \times \frac{14}{62} \times NO_3 - \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

N<sub>2</sub>O = emissão de N<sub>2</sub>O [kg N<sub>2</sub>O/ha]

EF1 = 0.01 (IPCC 2006)

N<sub>tot</sub> = entrada total de nitrogênio [kg N/ha]

EF4 = 0.01 (IPCC 2006)

NH<sub>3</sub> = Perdas de vinhaça sob a forma de amoníaco [kg de NH<sub>3</sub> / ha];

14/17 = conversão de kg NH<sub>3</sub> para kg NH<sub>3</sub>-N

EF5 = 0.0075 (IPCC 2006)

NO<sub>3</sub>- = Perdas de vinhaça sob a forma de nitrato [kg NO<sub>3</sub>- / ha]

14/62 = conversão de kg NO<sub>3</sub>- para kg NO<sub>3</sub>-N

O cálculo das emissões de NO<sub>x</sub> baseia-se na fórmula de Nemecek e Kägi (2007).

$$NO_x = 0,21 \times N_2O \quad \text{Equação 5}$$

O resumo dos cenários propostos para análise do desempenho ambiental do etanol pode ser observado na Figura 3.4.

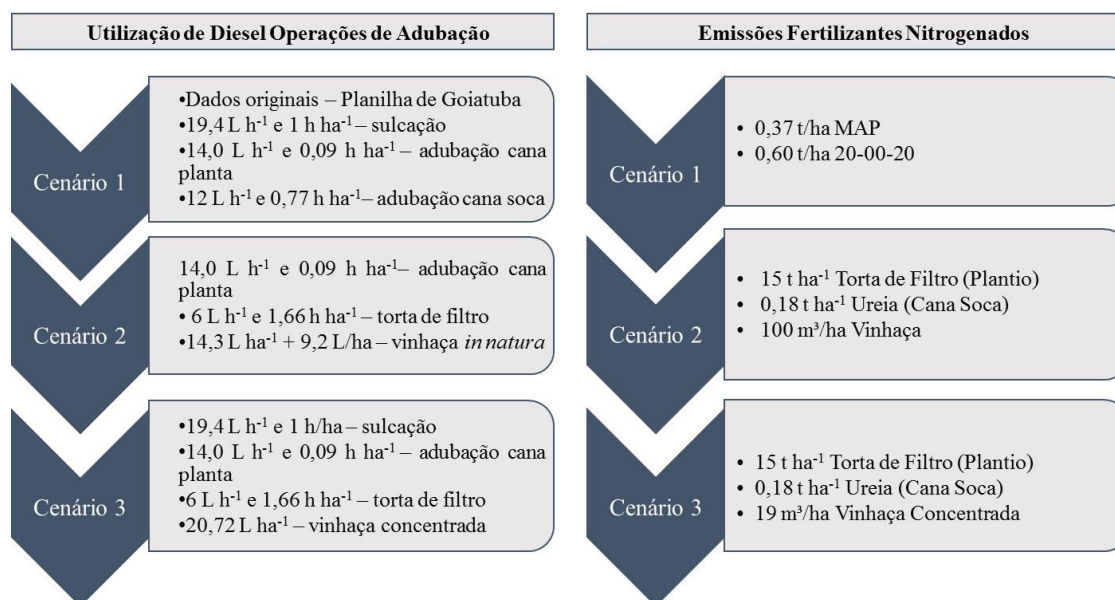


Figura 3.4 - Resumo dos cenários para análise de impactos ambientais.

Fonte: Elaboração Própria.

Posteriormente, as análises de utilização de diesel, quantificação de emissões de N<sub>2</sub>O dos fertilizantes nitrogenados dos cenários e também diferenças na utilização dos fertilizantes minerais KCl e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> foram aplicados em uma análise de ciclo de vida realizada para a região de Goiatuba. Os dados foram gerados pelo grupo de ciclagem de nutrientes da EMBRAPA Agrobiologia a partir dos dados do painel realizado com os Produtores, sendo estes utilizados e/ou extraídos do Script (Software) “Cálculo da Eficiência energética e emissão de gases de efeito estufa no cultivo da cana-de-açúcar”. Todos os insumos e práticas agrícolas utilizadas foram convertidos em energia por meio da multiplicação do produto físico pelos respectivos índices de conversão (coeficientes energéticos), computados em Mega Joule (MJ) (ASSENHEIMER et al., 2009; CAPELLESSO e CAZELLA, 2013).

Os principais aspectos metodológicos da análise se baseiam na conversão dos insumos e práticas agrícolas em energia (caloria), que se orientou na bibliografia, sendo calculada e adaptada para as condições da pesquisa, tanto para entradas (fatores necessários para a produção) quanto para saídas (produção de etanol) (CAPELLESSO e CAZELLA, 2013).

Para os cálculos do consumo de energia nas operações agrícolas (distribuição de corretivos; plantio; transporte interno; aplicação de herbicidas, inseticidas e fungicidas; colheita) foram utilizados os gastos de combustível ( $L h^{-1}$ ) do conjunto (trator + implemento) ou máquina utilizada, juntamente com o rendimento desse conjunto ou máquina ( $ha h^{-1}$ ). Com esses dados, foi realizada uma divisão do gasto de combustível ( $L h^{-1}$ ) pelo rendimento ( $ha h^{-1}$ ) obtendo-se os gastos de combustível ( $L ha^{-1}$ ), o quais foram multiplicados pelo valor calorífico do óleo diesel ( $43,93 MJ L^{-1}$ ) para se estimar o gasto de energia.

Os gastos energéticos para o processamento da cana-de-açúcar na usina para produção de etanol foram computados de acordo com Soares et al. (2009). Tais autores consideram que as usinas brasileiras têm potencial ou produzem toda a energia que consomem pela queima do bagaço em caldeiras de alta pressão, cujo vapor gerado aciona turbinas que produzem eletricidade em unidades de co-geração. Diante disso, os maiores ingressos de energia fóssil estão associados ao material usado nas construções, nos equipamentos das usinas e reagentes químicos. Segundo esses autores, estima-se que uma usina consuma com os materiais citados anteriormente cerca de  $2611,1 MJ ha^{-1} ano^{-1}$  para produzir cerca de  $6.510 L ha^{-1}$  de etanol. Desta forma, estima-se que o valor energético gasto para fabricar o etanol na usina é de  $0,401 MJ L^{-1}$ .

No que diz respeito às saídas de energia (energia produzida), a produtividade de colmos (saída) foi convertida para litros de álcool produzido e após isso convertido em energia pela multiplicação da quantidade de litros produzidos pelo valor calorífico do etanol ( $23,70 MJ L^{-1}$ ) (SALLA e CABELLO, 2010). Os restos culturais deixados na lavoura após a colheita foram desconsiderados das saídas, uma vez que são reincorporados ao sistema (CAPELLESSO e CAZELLA, 2013).

Ainda para cana-de-açúcar outros dados médios e/ou coeficientes energéticos foram utilizados, para estimar as saídas de energia, tais como: 1) 1 tonelada de cana-de-açúcar fresca rende 86 litros de álcool (URQUIAGA et al., 2005); 2) 1 tonelada de cana-de-açúcar fresca rende 140 quilos de massa seca de bagaço (MANOCHIO, 2014).

Por fim, para se calcular a eficiência energética (EE), foi realizada a divisão da energia produzida ( $MJ ha^{-1}$ ) pela consumida ( $MJ ha^{-1}$ ), em cada UP, enquanto o balanço energético resultou da diferença entre a energia produzida ( $MJ ha^{-1}$ ) e a consumida ( $MJ ha^{-1}$ ) (SANTOS et al., 2013).

Uma das maneiras de estimar a contribuição nas emissões de GEEs pela produção agroindustrial de etanol de cana-de-açúcar e de grãos pode ser através da conversão dos gastos

energéticos fósseis em emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> e com dados *default* de emissão de GEEs publicados na literatura (MACEDO et al., 2004; 2008; SOARES et al., 2009).

A emissão de GEEs na fabricação, embalagem e transporte dos fertilizantes foi estimada baseando-se na quantidade de energia gasta nas etapas de produção e transporte (GJ kg<sup>-1</sup>) e quantidade de gases emitidos pela principal fonte de energia (gás natural) utilizada na produção do fertilizante (kg CO<sub>2</sub>eq GJ). De acordo com Gellings e Parmenter (2004) as exigências de energia para produzir, embalar e transportar fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos são respectivamente de 0,077; 0,016 e 0,013 GJ kg<sup>-1</sup>. Para a produção dos fertilizantes, há predominância da energia térmica (gás natural) (NARDI et al., 2004; SOARES et al., 2009). Segundo o IPCC (2006) para cada 1 GJ de energia derivada de gás natural são emitidos 56,1 kg CO<sub>2</sub>, 0,001 kg CH<sub>4</sub> e 0,0001 kg N<sub>2</sub>O. Baseados nestes dados apresentados anteriormente pode-se estimar que a produção, embalagem e transporte de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, emitem respectivamente 4,32, 0,90 e 0,73 kg de CO<sub>2</sub>eq por kg de fertilizante em plantas modernas operando com gás natural.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Influência dos Fertilizantes nos Custos de Produção da Cana-de-Açúcar

No sentido dos custos agrícolas e do levantamento realizado pelo PECEGE (2015) com fornecedores de cana, a Figura 4.1 propõe a distribuição dos custos sob a perspectiva da participação relativa dos insumos, ou seja, uma comparação de como os insumos afetam os custos de produção.

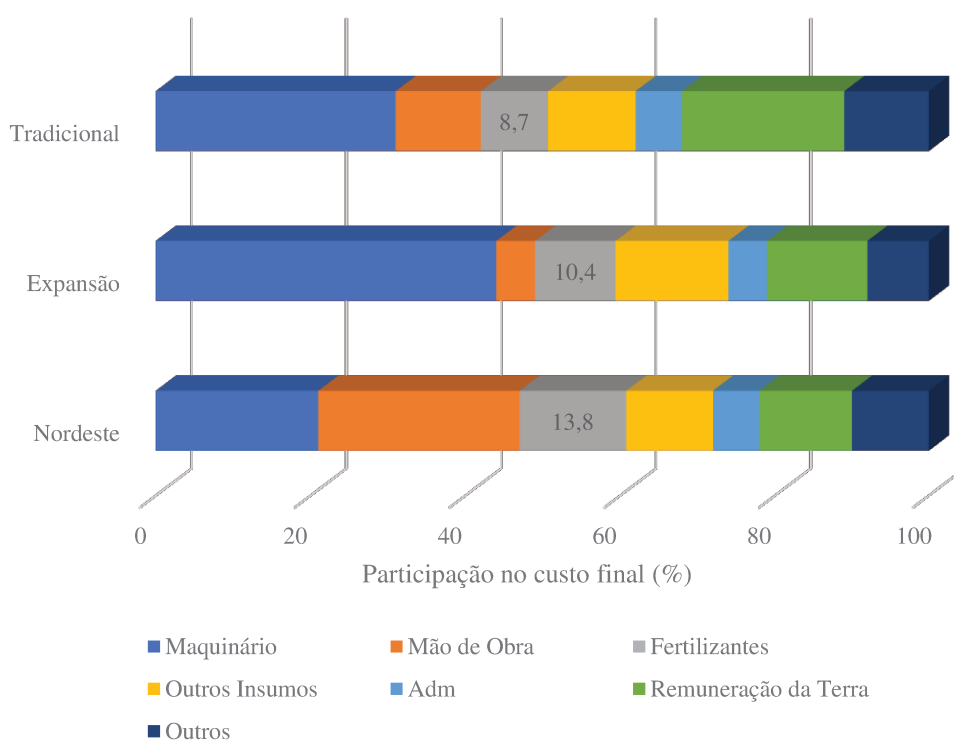


Figura 4.1 - Distribuição relativa dos fatores de formação dos custos de produção de cana-de-açúcar para fornecedores.

Fonte: PECEGE (2015).

No caso da representatividade dos fertilizantes nos custos operacionais, a porcentagem encontrada passa para 16,3%, 15,9% e 24,7% para as regiões Tradicional, Expansão e Nordeste, respectivamente. Para os custos operacionais totais (com depreciação), os valores são de 11,1%, 12,1% e 16,1% para as mesmas respectivas regiões.

A análise da influência dos fertilizantes na composição dos custos totais de produção da cana-de-açúcar nas safras 2009/10 a 2015/16, considerando as regiões levantadas de Assis –

SP, Catanduva – SP, Goiatuba – GO, Jacarezinho – PR, Jaú – SP, Piracicaba – SP, Porecatu – PR, Quirinópolis – GO, Sertãozinho – SP, Uberaba – MG, gerou os resultados demonstrados na Figura 4.2.

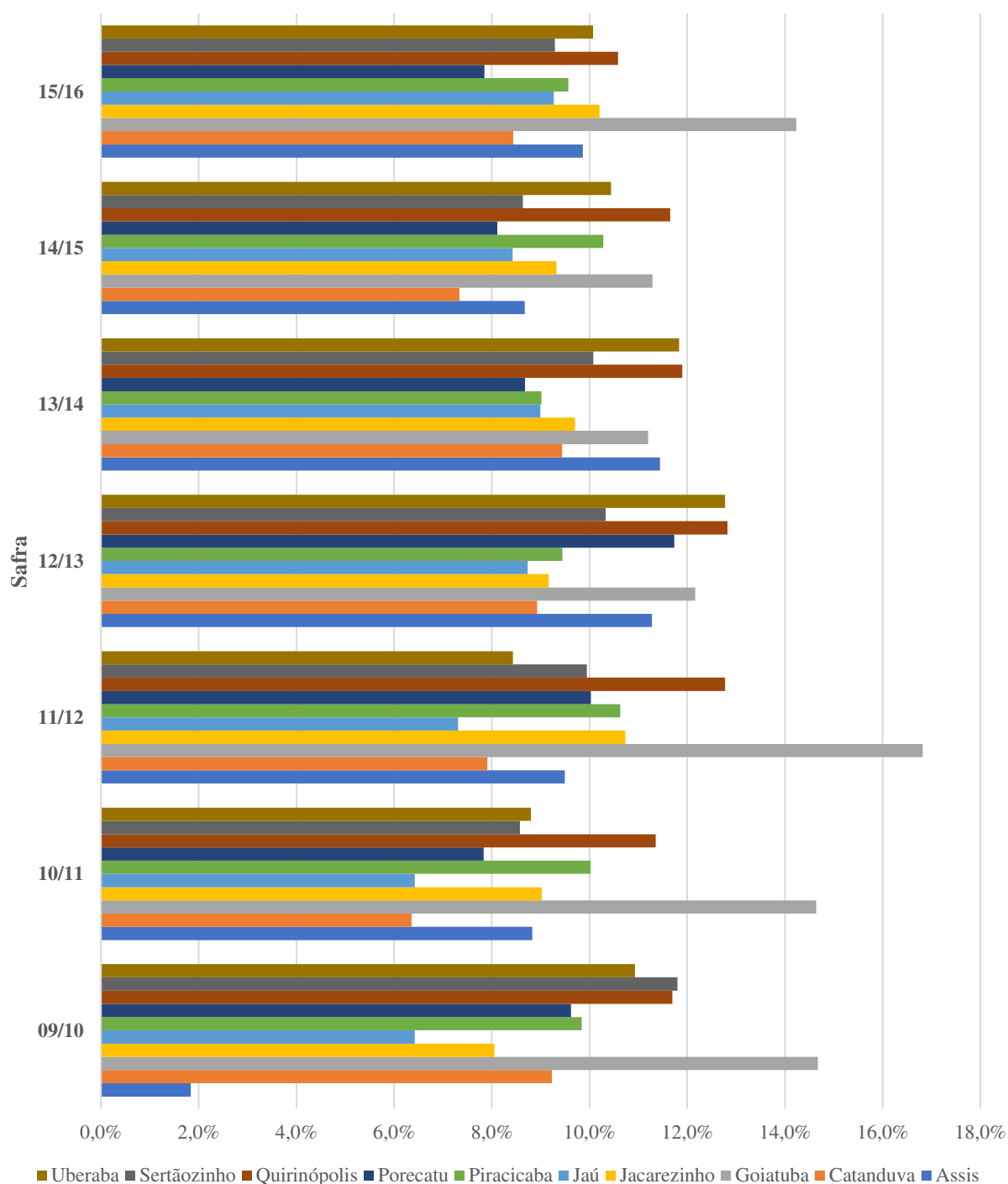


Figura 4.2 - Representatividade dos custos com fertilizantes no Custo Total para produção de cana-de-açúcar em diferentes painéis, desde a safra 2009/10.

Fonte: Elaboração Própria.

A partir dos dados, é possível notar que as regiões que possuem maior representatividade dos custos com fertilizantes nos custos totais de produção de cana-de-açúcar são Goiatuba, Quirinópolis e Uberaba, sendo, nestas regiões, as médias de representatividade dos fertilizantes no custo total ao longo das safras consideradas de 13,6%, 11,8% e 10,5%, respectivamente.

Na região de Goiás, uma possível explicação pode estar na concorrência quanto à produção de culturas voltadas para exportação. Segundo a FAEG (2010), com as altas nos preços das commodities agrícolas no mundo todo, dadas principalmente as quebras de safras causadas por problemas climáticos e o crescimento da demanda, a procura mais intensa por insumos acarretou um aumento nos valores dos produtos, principalmente dos fertilizantes.

Foram muitas as dívidas acumuladas ao longo das últimas safras, o que obrigou as empresas produtoras de cana a reduzir investimentos e despesas para equilibrar seus orçamentos, conforme descrito em EPE (2016) e na Figura 4.3. Essa situação implicou em adiamento da expansão dos canaviais, devido, também, à elevação dos preços do arrendamento da terra, a não realização adequada dos tratos culturais, em função da alta dos preços dos fertilizantes, já que estes são muito responsivos ao preço do dólar - muitos produtos ou componentes dos produtos são importados - e, finalmente, à não renovação dos canaviais. Dessa forma, apesar da alta na taxa de câmbio e no preço dos fertilizantes, não houve aumento significativo da representatividade desses produtos, mas por conta também do aumento dos custos totais finais, o que acaba deixando os resultados proporcionais.

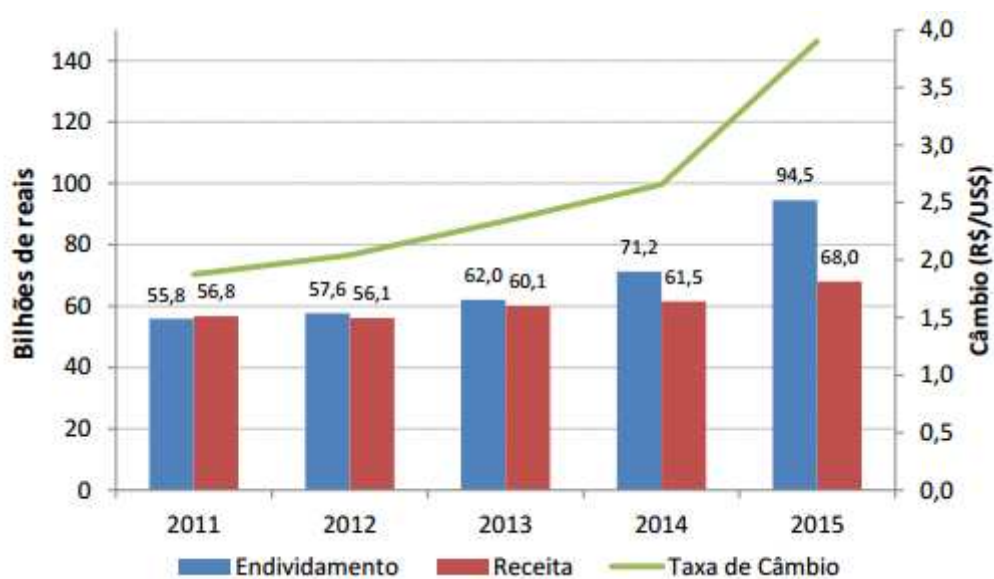


Figura 4.3 - Endividamento e Receita do Setor Sucroenergético (Centro-Sul) e Câmbio.

Fonte: DATAGRO, adaptado de EPE (2016).

Segundo dados da Associação Nacional para Difusão dos Adubos (ANDA, 2016), as entregas de fertilizantes ao consumidor final concluíram o mês de agosto de 2016 com recorde histórico em um único mês de 3.924 mil toneladas, registrando alta de 9,9% em relação ao mesmo período de 2015, quando foram entregues 3.569 mil toneladas. Em nutrientes, as entregas de fertilizantes nitrogenados apresentaram alta de 11,9% nos oito meses de 2016, atingindo 2.425 mil toneladas, contra 2.166 mil toneladas do mesmo período de 2015, em função do aumento da demanda para milho, café e cana-de-açúcar. Já os fertilizantes fosfatados ( $P_2O_5$ ) apresentaram alta de 6,7% nas entregas de janeiro a agosto de 2016 em relação ao mesmo período do ano anterior, alcançando 2.931 mil toneladas, contra 2.747 mil toneladas de 2015. Os fertilizantes potássicos ( $K_2O$ ) registraram alta de 9,1%, passando de 3.095 mil toneladas em 2015 para 3.376 mil toneladas em 2016, resultado do aumento da demanda para milho safrinha, café, cana-de-açúcar e entregas para a safra grãos 2016/2017.

O Estado do Mato Grosso é líder nas entregas ao consumidor final, concentra o maior volume no período analisado de janeiro a agosto de 2016, atingindo 4.432 mil toneladas, seguido do estado do Paraná com 2.772 mil toneladas, Rio Grande do Sul com 2.307 mil toneladas, São Paulo com 2.264 mil toneladas e Minas Gerais com 2.017 mil toneladas (ANDA, 2016).

Apesar da logística de fertilizantes estar associada mais à produção de grãos, a cultura da cana-de-açúcar se beneficia em grande parte, já que as principais regiões produtoras acabam se contrapondo. A Figura 4.4 a seguir demonstra as principais regiões produtoras da cultura.

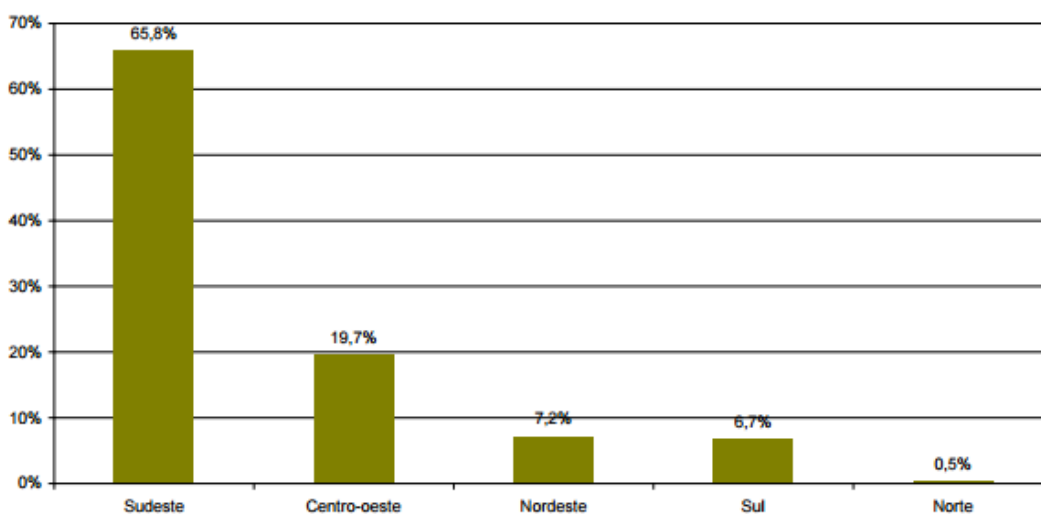


Figura 4.4 - Produção de cana-de-açúcar no Brasil por região.

Fonte: CONAB, 2016.

Quanto à intensidade do uso de fertilizantes, das culturas no Brasil com área acima de 1 milhão de hectares, a cana-de-açúcar ocupa o quarto lugar em uma lista de 10 culturas, com 460 kg (de uma fórmula média de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) por hectare (NOVACANA, 2013).

Quanto às análises de comparação de custos dos cenários 1, 2 e 3 descritos no item de metodologia, obtiveram-se os seguintes resultados quanto aos custos de produção agrícola, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Custos de Produção Agrícola, considerando os Cenários 1, 2 e 3.

		<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
<b>COE</b>	R\$/ha	3.367,28	3.337,91	3.035,56
	R\$/t	35,08	34,77	31,62
<b>COT</b>	R\$/ha	4.610,06	4.514,79	4.212,44
	R\$/t	48,02	47,03	43,88
<b>CT</b>	R\$/ha	5.933,80	5.821,92	5.519,57
	R\$/t	61,81	60,64	57,50
<b>Diferença do Cenário Base</b>		-	-1,9%	-7,0%

Fonte: Elaboração Própria.

Ou seja, a competitividade da vinhaça concentrada é muito aparente, diminuindo os custos agrícolas na ordem de 7,0%. No caso da representatividade dos custos com fertilizantes no CT, estes passam de 14,2% para 4,7% com a aplicação de vinhaça in natura e torta de filtro e 4,95% com a aplicação de vinhaça concentrada e torta de filtro.

Uma análise de sensibilidade foi elaborada para assegurar que os valores encontrados de aplicação e transporte de vinhaça concentrada (R\$/m<sup>3</sup>) na literatura não estivessem refletindo um cenário equivocados. A Figura 4.5 a seguir demonstra que, para que o custo total de produção de cana-de-açúcar atingisse o valor do cenário 1, o custo da vinhaça concentrada precisaria ser em torno de R\$32,00 /m<sup>3</sup>, da mesma forma, para que o custo total de produção fosse igualado ao do cenário 2, o custo da vinhaça concentrada precisaria ser próximo de R\$25,00 /m<sup>3</sup>. Ou seja, o valor em R\$/m<sup>3</sup> da vinhaça concentrada precisaria ser significativamente muito mais alto do que o considerado nos cálculos para que este cenário não representasse redução de custos de produção.

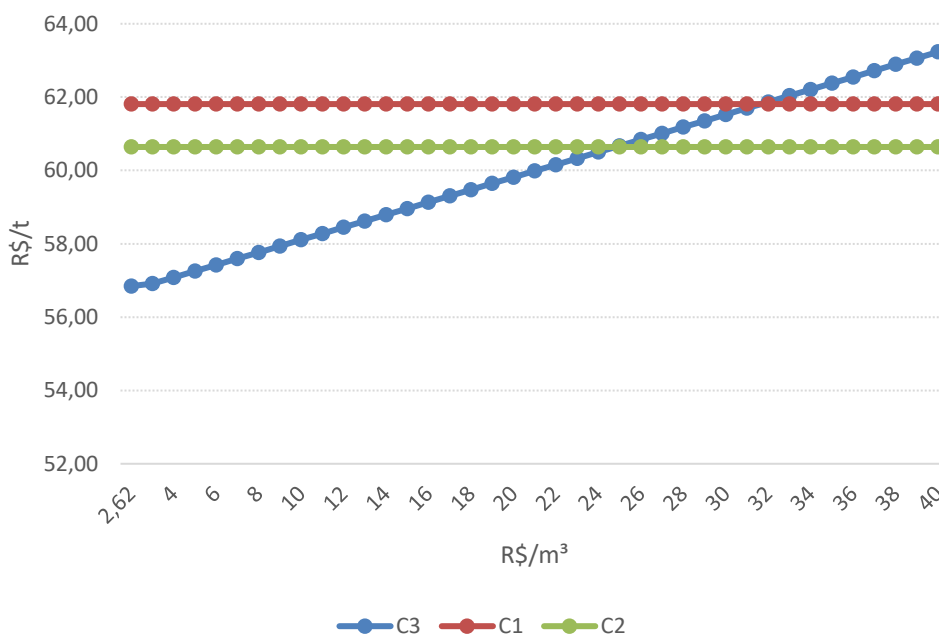


Figura 4.5 - Análise de sensibilidade dos custos de aplicação e transporte da vinhaça concentrada.

Fonte: Elaboração Própria.

A partir dos resultados obtidos de custos agrícolas de produção conforme os cenários propostos, o aumento ou a diminuição de custos representadas pelo uso de fertilizantes minerais ou orgânicos foram aplicados nos custos das operações de formação do canavial e tratos de cana soca, na planilha utilizada para levantamento dos custos de produção de uma agroindústria local. No cenário 1 foi aplicada uma variação positiva de R\$463,99/ha na formação e R\$96,41 nos tratos de cana soca, o cenário 2 manteve os parâmetros originais da planilha, a qual já considerava aplicação de vinhaça e torta de filtro, e no cenário 3 foi aplicada uma redução de custos representada pela vinhaça concentrada de R\$350,22 nos tratos de cana soca (única diferença do cenário 2 são os custos da aplicação de vinhaça concentrada). Os resultados obtidos para o custo final do produto etanol encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Custos de Produção do Etanol, considerando os Cenários 1, 2 e 3.

		<b>Anidro (R\$/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Hidratado (R\$/m<sup>3</sup>)</b>
<b>C1</b>	<b>COE</b>	901,11	856,37
	<b>COT</b>	1.228,73	1.167,31
	<b>CT</b>	1.557,12	1.478,98
<b>C2</b>	<b>COE</b>	890,34	846,15
	<b>COT</b>	1.210,27	1.149,79
	<b>CT</b>	1.535,63	1.458,59
<b>C3</b>	<b>COE</b>	862,37	819,60
	<b>COT</b>	1.179,89	1.120,96
	<b>CT</b>	1.505,27	1.429,77

Fonte: Elaboração Própria.

## 4.2 Influência dos Fertilizantes no Impacto Ambiental

A partir dos dados do painel de Goiatuba, foram destacados os valores gastos com diesel em todas as operações que envolvem a aplicação de fertilizantes NPK, para os três cenários considerados – somente fertilizantes minerais, vinhaça *in natura* e torta de filtro e vinhaça concentrada e torta de filtro. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Consumo de diesel nas operações que envolvem aplicação de fertilizantes nos diferentes cenários considerados (transporte no campo + aplicação).

	<b>Diesel (L ha<sup>-1</sup>)</b>		
	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
<b>Sulcação</b>	19,64	<b>19,64</b>	<b>19,64</b>
<b>Aplicação de Fertilizante</b>	1,26	1,26	1,26
<b>Adubação de Cobertura</b>	9,24	-	-
<b>Aplicação de Torta</b>	-	9,96	9,96
<b>Aplicação de Vinhaça</b>	-	23,51	20,72
<b>Total</b>	<b>30,14</b>	<b>54,37</b>	<b>51,58</b>

Fonte: Elaboração Própria.

Com relação ao diesel total utilizado nas operações que envolvem adubação, nota-se que o cenário que envolve a aplicação de vinhaça *in natura* é o menos atrativo, com um aumento do consumo de diesel do cenário básico na ordem de 24,23 L ha<sup>-1</sup> na safra. Ressalta-se que a

operação de sulcação foi mantida nos cenários 2 e 3, no entanto, não mais envolve a aplicação de fertilizantes.

O consumo de combustíveis fósseis no setor agrícola corresponde basicamente ao uso de diesel dos maquinários agrícolas e caminhões (WALTER et al., 2008). O uso de diesel nas operações agrícolas de plantio, manutenção, colheita e transporte da cana-de-açúcar até a usina representa a maior fonte de emissões de GEE proveniente da queima de combustível fóssil no setor agrícola referente à produção de cana-de-açúcar, especialmente no sistema de colheita mecanizada. A redução do consumo de diesel no setor agrícola é necessária para a redução da energia fóssil demandada nesse setor, já que a razão entre energia renovável produzida e a energia fóssil utilizada atualmente está próxima de 9 (MACEDO et al., 2008).

Ometto, Hauschild e Roma (2009) concluíram, por meio da análise do ACV do etanol hidratado de cana-de-açúcar, que este contribui para diversos impactos ambientais, como: aquecimento global, formação de ozônio, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade e toxicidade humana; e as principais causas para o maior potencial de impacto indicado pela normalização utilizada foi a aplicação de nutrientes no solo, a queima na colheita, bem como a utilização de diesel para transporte.

A contabilização das emissões de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NO}_x$  para os cenários 1, 2 e 3 estão representadas na Tabela 4.4 a seguir.

Tabela 4.4 - Emissões advindas de fertilizantes nitrogenados, por hectare.

	Emissões ( $\text{kg ha}^{-1}$ )		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
<b><math>\text{NH}_3</math> Fert Mineral</b>	21,83	14,75	14,75
<b><math>\text{NH}_3</math> Fert Orgânico</b>	-	10,80	10,80
<b><math>\text{NO}_3^-</math></b>	36,01	35,10	35,10
<b><math>\text{N}_2\text{O}</math></b>	2,13	2,82	2,82
<b><math>\text{NO}_x</math></b>	0,45	0,59	0,59

Fonte: Elaboração Própria.

Nota-se que há aumento das emissões nos cenários 2 e 3, isso porque os fertilizantes orgânicos possuem quantidade de N significativa.

A partir da Figura 4.6 a seguir, fica evidente a contribuição dos fertilizantes contendo N para a emissão de  $\text{NO}_3^-$ , tornando ainda mais importante a questão das recomendações corretas de formulações e quantidades a serem aplicadas na cultura. Quando os adubos nitrogenados

ou os orgânicos são aplicados ao solo, eles passam da forma mineral ou orgânica para essa forma aniônica (nitrato- $\text{NO}_3^-$ ), que é preferencialmente absorvida pelas plantas, sendo transformada em compostos como aminoácidos e proteínas (MALAVOLTA e al., 1997). Se doses excessivas desses adubos forem aplicadas, as plantas não são capazes de absorver todo o nitrato, que pode ser levado às águas subterrâneas (CANTARELLA, 2007), reduzindo a qualidade da água para consumo humano porque o nitrogênio presente na forma de nitrato na água potável é tóxico à saúde. Esse nitrato também pode ser levado aos rios, causando aumento de algas.

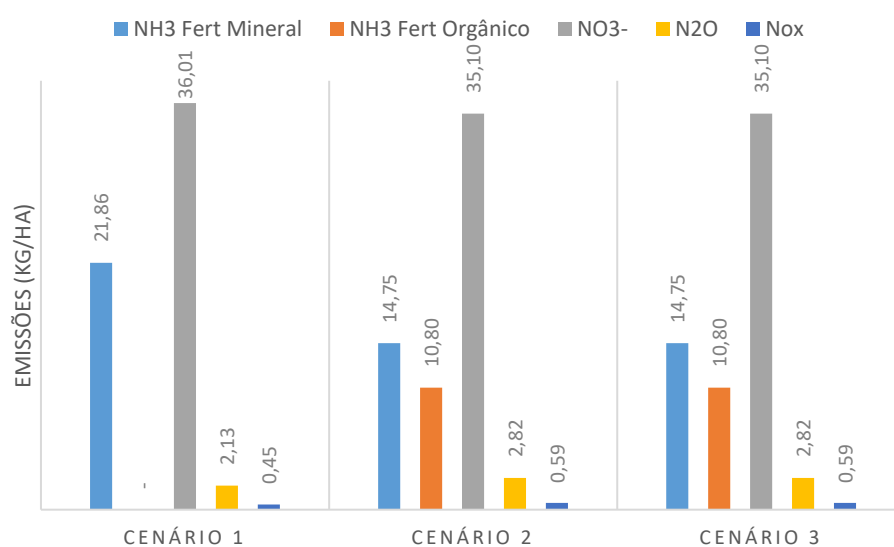


Figura 4.6 - Emissões advindas de fertilizantes nitrogenados, por hectare.

Fonte: Elaboração Própria.

Também é preciso considerar o potencial de emissões advindos da aplicação da vinhaça. A fertirrigação com vinhaça possui um alto potencial para a emissão de  $\text{CH}_4$  devido à sua alta concentração de matéria orgânica e nutrientes, sendo microbiologicamente ativa. Apesar disto, no balanço de gases do efeito estufa realizado por Macedo et al., 2008, para o bioetanol de cana-de-açúcar, os autores consideram que não se promovem condições anaeróbicas e, portanto, não existem emissões de  $\text{CH}_4$  significativas durante a fertirrigação. No trabalho elaborado por Soares, 2009, assume-se um valor arbitrário de emissão de  $\text{CH}_4$  nos canais de distribuição de 0,2% do carbono contido na vinhaça, no entanto, as tecnologias estão sendo adaptadas, como por exemplo, utilização de tubulações fechadas e lonas. Portanto, a questão maior parece estar mais relacionada às tecnologias de aplicação, do que sua utilização.

A vinhaça concentrada apresenta vantagens ambientais quando comparada à vinhaça *in natura*: redução das pressões antrópicas sobre os depósitos minerais; redução do risco de arraste de vinhaça para os corpos d'água superficiais; redução do risco de percolação da vinhaça para as águas subterrâneas; mitigação das emissões dos gases de efeito estufa, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, tanto pelo menor consumo de combustíveis fósseis e energia elétrica para o transporte e aplicação da vinhaça no campo (caminhões, hidrorolls, bombas de recalque, etc), quanto pela menor exposição da vinhaça ao ambiente atmosférico desde sua produção até a sua aplicação; redução e, em alguns casos, eliminação dos fortes odores advindos da fertirrigação com vinhaça; redução da sobrecarga exercida sobre os pavimentos de rodovias estaduais e estradas vicinais, tanto pelo menor fluxo de caminhões quanto pela implantação de sistemas canalizados para o transporte de vinhaça, sendo este último viabilizado pela redução do volume a ser transportado e consequente redução das dimensões das tubulações e custos associados (CRUZ, 2011).

Além dessas vantagens, outra, em especial, tornou-se grande atrativo para a implantação da tecnologia da concentração da vinhaça: a redução do consumo de água através da reutilização do condensado (CRUZ, 2011).

Deve-se ressaltar, no entanto, que a vinhaça concentrada também apresenta alguns gargalos, como consumo elevado de vapor; consumo de energia elétrica nos bombeamentos, resfriamento, etc., sendo que nas usinas que fazem a cogeração, a produção de energia elétrica será menor; exige grandes investimentos na implantação do sistema; demanda de área para a instalação do sistema de concentração da vinhaça, nem sempre disponível nas usinas mais antigas.

Quanto à análise voltada para o ciclo total de produção de etanol, as emissões de N<sub>2</sub>O e CO<sub>2eq</sub> foram consideradas em uma análise de ciclo de vida elaborada para a região de Goiatuba. Segundo o IPCC (2006), estima-se que 1% do N adicionado ao solo é emitido diretamente na forma de N<sub>2</sub>O. Os resultados são apresentados nas Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Emissões realizadas e evitadas de gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub> eq) durante as etapas de produção e distribuição do etanol de cana-de-açúcar para os cenários de análise.

Fontes de emissão	Resultados		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	CO <sub>2</sub> eq. <sup>a</sup>		
<b>Tratores, máquinas e implementos agrícolas</b>	211,26	211,26	211,26
<b>Combustível (diesel)</b>	606,02	715,09	706,00
<b>Lubrificantes</b>	7,36	7,36	7,36
<b>Graxa</b>	2,43	2,43	2,43
<b>Mudas</b>	44,75	44,75	44,75
<b>Calcário</b>	260,00	260,00	260,00
<b>Fertilizante nitrogenado</b>	1413,85	1035,57	1035,57
<b>Fertilizante fosfatado</b>	415,14	0,00	0,00
<b>Fertilizante potássico</b>	171,39	52,87	52,87
<b>Herbicidas</b>	63,09	63,09	63,09
<b>Defensivos agrícolas</b>	29,51	29,51	29,51
<b>Consumo industrial para processamento do produto colhido</b>	327,91	327,91	327,91
<b>Transporte insumos a Lavoura</b>	33,03	33,03	33,03
<b>Distribuição do Etanol</b>	217,30	217,30	217,30
Emissão total de GEE fóssil	3803,04	3000,18	2991,09
Produtividade do etanol (L ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	8600,00	8600,00	8600,00
Quilos de CO <sub>2</sub> eq emitido por litro de etanol produzido	0,44	0,35	0,35

Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados demonstram que os cenários 2 e 3 são mais vantajosos quanto às emissões totais de GEE e aos quilos de CO<sub>2</sub>eq emitidos por litro de etanol produzido, isso porque, apesar do aumento das emissões advindas do N, a utilização dos fertilizantes orgânicos evita o uso do P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e KCl, que também contribuem significativamente para as emissões de CO<sub>2</sub>eq. No entanto, é preciso atenção quanto à utilização da ureia como fonte de fertilizante nitrogenado nestes cenários, a qual apresenta alta taxa de volatilização, que pode também ser emitida à atmosfera. Esse fenômeno pode ser amenizado a partir da prática da incorporação à camada superficial do terreno, que conduz a menores perdas do que a aplicação superficial apenas, já que aumenta as chances da amônia ser retida no solo (VITTI et al., 2006). Além disso, a ureia é o fertilizante nitrogenado mais utilizado no Brasil, devido ao seu menor custo por unidade de N em relação aos demais adubos que contêm esse nutriente; dessa forma, um estudo envolvendo fontes diferentes desse fertilizante se faz necessário.

## 5 CONCLUSÕES

Quanto a demandas futuras de etanol e consequentemente de insumos agrícolas, como os fertilizantes, uma questão principal permeia sobre quais são as possibilidades de ainda se obterem grandes avanços tecnológicos na produção e nos usos do etanol nos próximos anos. Pode-se dizer que a produção de etanol no Brasil atingiu um estágio “avançado”, com os custos competitivos e alta qualidade do produto, no entanto, esperam-se ainda avanços incrementais, com áreas a serem exploradas com grandes potenciais de aperfeiçoamento.

Há ainda muitos problemas enfrentados pelo setor sucroenergético, principalmente no campo, no que se relaciona com a produtividade da cultura, bem como da importância discutida sobre os impactos econômicos e ambientais representados pelos insumos dos fertilizantes utilizados na cultura, em especial pela forte dependência de importação desses produtos. A partir dos resultados apresentados neste estudo, fica claro que é necessário não apenas continuar com os avanços graduais sobre as tecnologias em uso, como também atingir grandes ganhos com o advento de algumas tecnologias em desenvolvimento. As possibilidades de incremento de produtividade e redução de custos na cadeia bioenergética a partir da cana-de-açúcar podem ser consideradas em contextos complementares, e é desejável e possível fazer a implementação completa das tecnologias já disponíveis e atualmente ainda em uso parcial, generalizando as melhores práticas agronômicas, industriais e de gestão.

No que tange à melhoria agrícola, pode-se citar a agricultura “de precisão”, desenvolvimento de melhores variedades (em especial para as novas áreas), e, principalmente, às práticas relacionadas ao uso de fertilizantes, buscando não apenas fontes mais sustentáveis como a eficiência na aplicação, como maior competitividade ambiental e econômica.

Os estudos apontados neste trabalho demonstraram que a utilização de vinhaça e torta de filtro como adubos orgânicos na cultura da cana-de-açúcar são alternativas viáveis para redução de custos de produção e de emissões de gases poluentes ao meio ambiente.

Quanto à diminuição de custos com relação à utilização de vinhaça *in natura* e torta de filtro e vinhaça concentrada e torta de filtro, ambos se mostram viáveis, representando diminuição de custos totais na produção da matéria-prima para o setor, na ordem de 2% para o cenário com vinhaça *in natura* e 7% com vinhaça concentrada.

Apesar dos cenários considerando vinhaça *in natura* e concentrada apresentarem maior utilização de combustível fóssil para sua aplicação, as emissões evitadas provenientes do não uso dos fertilizantes minerais tornam a prática ainda viável do ponto de vista ambiental: os

cenários com utilização de vinhaça *in natura* e vinhaça concentrada apresentaram redução no fator de emissão de GEE na ordem de 20%. No entanto, as fontes de fertilizantes nitrogenados devem ser estudadas com maior cuidado. A ureia representa grande fator de emissão de gases do efeito estufa.

Os cenários apresentados neste estudo utilizaram fatores técnicos mais básicos, bem como quantificações gerais encontradas na literatura. Um estudo mais aprofundado com quantificações específicas da região de Goiatuba (como características do solo, composição da vinhaça, etc) dariam um embasamento maior para as análises, que poderiam ser estendidas também para os outros painéis levantados. Assim como a análise com relação à agroindústria, a qual fica restrita por considerar características específicas de produção de uma usina. Quando os parâmetros são modificados, podem-se obter diferentes situações, como por exemplo, alterando-se o mix de produção, tem-se maior ou menor disponibilidade de vinhaça.

Além disso, torna-se importante considerar em próximos trabalhos o surgimento de novas tecnologias de aplicação da vinhaça, como por exemplo, a biodigestão. A biodigestão anaeróbia da vinhaça permite o seu aproveitamento energético sob a forma de biogás (mistura gasosa rica em metano), que pode ser queimado diretamente em motogeradores, ou purificado a biometano (que tem aplicações mais diversas). Em ambos os casos, o perfil ambiental do etanol tende a ser amplamente favorecido, sem que o potencial de reciclo dos nutrientes da vinhaça seja afetado.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALCARDE, J.C; GUIDOLIN, J.A. & LOPES, A.S. Os adubos e a eficiência das adubações. São Paulo, ANDA, 1998, 35p. 3a ed. (Boletim Técnico, 6).

ALMEIDA, J.R. de. O problema da vinhaça em São Paulo. Boletim do Instituto Zimotécnico, Piracicaba, n.3: p. 1-24, 1952.

ALVAREZ, R. & FREIRE, E.S. Adubação da cana-de-açúcar. VI. Fracionamento da dose de potássio. Bragantia, 21:31-43, 1962.

ALVES, B.J.R.; SANTOS, J.C.F. dos; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Métodos de determinação do nitrogênio em solo e planta. In: HUNGRIA, M.E.; ARAÚJO, R.S. (Ed.). Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola. Brasília: Embrapa-SPI, 1994. p.449-470.

ANGHIONI, I. Uso do fosforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. Revista Brasileira de Ciencia do Solo, Viçosa, v.16, p. 349-353, 1992.

ASSENHEIMER, A.; CAMPOS, A. T.; GONÇALVES JÚNIOR, A. C. Análise energética de sistemas de produção de soja convencional e orgânica. Ambiência, 5 (03): 443-455, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 2001. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Disponível em: < <http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-14.040-Gest%C3%A3o-Ambiental-avaliac%C3%A3o-do-ciclo-de-vida-principios-e-estrutura.pdf>>. Acesso em; 30 jan. 2017.

Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes (IFA). 2016. Disponível em: < <http://www.fertilizer.org/>>. Acesso em: 22 ago. 2016.

Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA). 2000. USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES E CORRETIVOS AGRÍCOLAS. Disponível em: < [http://www.anda.org.br/multimidia/boletim\\_04.pdf](http://www.anda.org.br/multimidia/boletim_04.pdf)>. Acesso em: 24 out. 2016.

Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA). Investimentos no Brasil, 2011. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/multimidia/investimentos.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA). MERCADO DE FERTILIZANTES - JANEIRO / AGOSTO – 2016. Disponível em: < <http://anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00>>. Acesso em: 15 set. 2016.

BAJEHBAJ, A. A.; QASIMOV, N.; YARNIA, M. Effects of drought stress and potassium on some of the physiological and morphological traits of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars. Journal of Food Agriculture & Environment, v. 7, p. 448-451, 2009.

BANCO MUNDIAL. Awakening Africa's Sleeping Giant, Prospects for Commercial Agriculture in the Guinea Savannah Zone and Beyond 2009.

Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES). 2013. A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3710.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3710.pdf)> Acesso em: 24 jun. 2016.

BARBOSA, V. RAMOS-DURIGAN, A.M.P.; GLÓRIA, N.A.; MUTTON, M.A. Uso da vinhaça concentrada na adubação de soqueira de cana-de-açúcar. STAB, Piracicaba, v.24, n. 6, p.6-8, 2006.

BOTEON, M.; LACERDA, M.P. Análise do impacto dos preços de fertilizantes no setor hortícola. 47º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Porto Alegre, julho de 2009.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Centro de Tecnologia Mineral. Agrominerais para o Brasil. Editores José Farias de Oliveira; Francisco Rego Chaves Fernandes; Zuleica C. Castilhos. Rio de Janeiro: CETEM; MCT, 2010. 297 p., il. color.

BRASIL. Decreto nº 8.384, de 29 de dezembro de 2014. Altera o Anexo ao Decreto no 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que aprova o Regulamento da Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. Diário Oficial, Brasília, DF, 30 dez. 2014. Seção 1, p. 1.

BRAUNBECK, O. A.; MAGALHÃES P. S. G. Avaliação tecnológica da mecanização da cana-de-açúcar. In: CORTEZ, L. A. B. (Org.). Bioetanol de Cana-de-Açúcar, P&D para Produtividade e Sustentabilidade. São Paulo: Blucher, p. 451-464, 2010.

BUSATO, J.G. Química do húmus e fertilidade do solo após adição de adubos orgânicos. 2008. 152 p. Tese (doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2008.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. Fertilidade do Solo, cap.7, 2007.

CANTARELLA, H.; CORRÊA, L.A.; PRIMAVESI, O. PRIMAVESI, A.C. Fertilidade do solo em sistemas intensivos de manejo de pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 19., 2002, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 2002. p. 99-132.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van. Adubação nitrogenada no estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO NITROGENADA NO BRASIL, 1.; REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 16., 1984, Ilhéus. Anais... Ilhéus: CEPLAC; SBSCS, 1986. p.47-79.

CAPELLESSO, A. J.; CAZELLA, A. A. Indicador de sustentabilidade dos agroecossistemas: estudo de caso em áreas de cultivo de milho. Ciência Rural, 43(12): 2297-2303, 2013.

CARVALHO, L.C.C. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, São Paulo, 1983. p.17.

CASTRO, C.; BALLA, A.; CASTIGLIONI, V. B. R.; SFREDO, G. J. Levels and methods of nitrogen supply for sunflower. *Scientia Agrícola*, v. 56, n. 4, p. 827-833, 1999.

CASTRO, C; OLIVEIRA, F. A. Nutrição e adubação do girassol. In: LEITE, R. M. V. B. C.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO, C. Girassol no Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2005. p. 317-373.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil. [On-line] CGEE, 2009. Disponível em: <[www.cgee.org.br](http://www.cgee.org.br)>. Acesso em: 27 fev. 2016.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA (CTC). Censo Varietal e de Produtividade em 2011, 2012. Disponível em: <[http://www.ctcanavieira.com.br/downloads/CTC%20\\_Censo2011-12baixa.pdf](http://www.ctcanavieira.com.br/downloads/CTC%20_Censo2011-12baixa.pdf)>. Acesso em: 23 fev. 2016.

CERRI, C.C.; PALA, A; ANDREUX, E; LOBO, M.E.; EDUARDO, B.P. Resíduos orgânicos da agroindústria canavieira: 1. Características físicas e químicas. *STAB*, v.6, n.93, p.34-37, 1988.

CHAVES, Arthur Pinto. Rotas tecnológicas convencionais e alternativas para a obtenção de fertilizantes. Agrominerais e Biocombustíveis. Capítulo de livro. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, inédito, no prelo, 2009.

CHEHEBE, José Ribamar B. Análise do Ciclo de Vida de Produtos. Rio de Janeiro, RJ. Qualitymark Editora, 1998, 104p.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). 2006. Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. Norma Técnica P4.231. Disponível em: <<http://www.ambientenet.eng.br/TEXTOS/VINHA%C3%87A.pdf>>. Acesso em 30 ago. 2016.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 20 out. 2016.

COPERSUCAR. Aproveitamento da vinhaça: viabilidade técnico-econômica. Boletim Técnico Copersucar, p. 1-66, 1978.

CORRÊA, J. B.; REIS JÚNIOR, R. A.; CARVALHO, J. G.; GUIMARÃES, P. T. G. Avaliação da fertilidade do solo e do estado nutricional de cafeeiros do sul de Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 25, n. 6, p.1279-1286, 2001.

CRUZ, Luiz Felipe Lomanto Santa. Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo. 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – Sp, 2011.

DELGADO, A. A.; CÉSAR, M. A. A. Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana. Piracicaba: Departamento de Tecnologia Rural - ESALQ/USP, 1990. 452 p.

DELGADO, A. A.; CÉSAR, M. A. A. Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana. Piracicaba: Departamento de Tecnologia Rural - ESALQ/USP, 1990. 452 p.

DEMATTE, J. L. I. Variedades de cana estão devendo. Idea News Cana & Indústria, ano 11, n. 41, p. 16-24, ago. 2012.

DEMATTE, J.L.I. Considerações a respeito da adubação nitrogenada e seu parcelamento em cana-planta. STAB: açúcar, álcool e subprodutos, Piracicaba, v.15, n.4, p.14, 1997.

DIAS, E.G.; LAJOLO, R.D. O meio ambiente na produção de fertilizantes fosfatados no Brasil. Agrominerais e Biocombustíveis. Capítulo de livro. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, inédito, no prelo, 2009.

DIAS, V. P. & FERNANDES, E. Fertilizantes: uma visão global sintética. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 24, p. 97-138, set. 2006.

EUROPEAN COMMISSION (EC). Relatório da Comissão ao Parlamento Europeu e ao Conselho sobre a viabilidade de elaboração de listas de zonas em países terceiros com baixas emissões de gases com efeito de estufa provenientes do cultivo. COM (2010) 427 final, 2010. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0427:FIN:PT:PDF>. Acesso em: 19 fev 2011.

ELIAS NETO, A. Biodigestão da vinhaça com reator anaeróbio de manta de lodo. São Carlos, EESC/USP, 1988. 30p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Adubação - resíduos alternativos. Disponível em: < [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-cucar/arvore/CONTAG01\\_39\\_711200516717.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-cucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html)>. Acesso em: 20 out. 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil: 2008. Disponível em: < [http://www.cnpso.embrapa.br/download/tpsoja\\_2008.pdf](http://www.cnpso.embrapa.br/download/tpsoja_2008.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2016.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). 2015. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2017.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). 2016. Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Petroleo/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 26 out. 2016.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. Londrina: Editora Planta, 2006. 402p.

ERNANI, P.R.; BARBER, S.A. Corn grow an/d changes of soil and root parameters as affected by phosphate fertilizers and liming. v. 26. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, 1991. p. 1309-1314.

ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, JAL.; CAMPOS, ML.; CAMILO, RJ. Influencia da combinação de fosforo e calcário no rendimento do milho. Revista Brasileira da Ciencia do Solo, Viçosa, V.24 p.537-544 ,2000.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Relatório Anual da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura – FAO. 2013. Disponível em: < <http://sna.agr.br/2013/06/roberto-rodrigues-sobre-o-relatorio-anual-da-fao-tecnologia-agricola-brasileira-aumentou-aproductividade-por-area-e-preservou-67-Milhoes-de-hectares/>> Acesso em:15 jun. 2016.

Federação da Agricultura e Pecuária de Goiás (FAEG). Disponível em: <<http://sistemafaeg.com.br/8-noticias/6098-fertilizantes-mais-caros-trazem-preocupacao-aos-produtores>>. Acesso em: 14 out. 2016.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Relatório Anual da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura. 2013. Disponível em: < <http://sna.agr.br/roberto-rodrigues-sobre-o-relatorio-anual-da-fao-tecnologia-agricola-brasileira-aumentou-a-productividade-por-area-e-preservou-67-milhoes-de-hectares/>> Acesso em: 03 mai. 2016.

FRANCO, H.C.J.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; SARTORI, R.H. & TRIVELIN, M.O. Acúmulo de nutrientes pela canaplanta.STAB Açúcar, Álcool Subpr., 26:47-51, 2008.

FRANCO, J.A.M; NETO, A.S. Produção de fertilizantes nitrogenados e suprimentos de matéria-prima. In: Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira. YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S; VITTI, G.C. IPNI Brasil, 2007, 722p.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. Vinhaça de cana-de-açúcar. Guaíra: Livraria e Editora Agropecuária, 2000.

GALLOWAY, J.N.; DENTENER, F.J.; CAPONE, D.G.; BOYER, E.W.; HOWARTH, R.W.; SEITZINGER, S.P.; ASNER, G.P.; CLEVELAND, C.C.; GREEN, P.A.; HOLLAND, E.A.; KARL, D.M.; MICHAELS, A.F.; PORTER, J.H.; TOWNSEND, A.R.; VOROSMARTY, C.J. Nitrogen cycles: past, present, and future. Biogeochemistry, Netherlands, v. 70, n. 2, p. 153-226, 2004.

GANDEZA, A. T.; SHOJI, S.; YAMADA, I. Simulation of crop response to polyolefin coated urea: I. Field dissolution. Soil Sci. Soc. Am. J. v. 55, p. 1462, 1991.

Gandeza, A.T., Shoji, S., Yamada, I. Simulation of crop response to polyolefin coated urea: I. Field dissolution. Soil Sci. Soc. Am. J. v.55, p. 1462, 1991.

GARCIA, J. R. O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel Brasileiro e a Agricultura Familiar na Região Nordeste. Dissertação de Mestrado, Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

GELLINGS, C. W.; PARMENTER, K. E. Energy efficiency in fertilizer production and use. In: GELLINGS, C.W.; BLOK, K. Efficient Use and Conservation of Energy. (eds.). Oxford, UK: UNESCO, Eolss Publishers, p.03-18, 2004.

GLÓRIA, N.A. Emprego da vinhaça para fertilização. Piracicaba: S.I., CODISTIL, 1976. Glória, N.A. Utilização racional dos resíduos da fabricação de açúcar e álcool. In: Workshop sobre a avaliação e manejo dos recursos naturais em áreas de exploração de cana-de-açúcar, 1997, Aracajú. Anais...Aracajú: [s.n.] 1997. p.83-111.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente. *Estudos Avançados*, v. 21, n. 59, 2007.

GONÇALVES, J. S.; FERREIRA, C. R. R. P. T.; SOUZA S. A. M. Produção nacional de fertilizantes, processo de desconcentração regional e maior dependência externa. *Informações Econômicas IEA*, SP, v.38, n.8, ago. 2008.

GRISOLI, Renata Patrícia Soares. Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar no Brasil e os critérios da diretiva europeia para energias renováveis. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo (escola Politécnica/ Faculdade de Economia e Administração/ Instituto de Eletrotécnica e Energia/ Instituto de Física), São Paulo, 2011.

HARTEMINK, A. E. Sugarcane for bioethanol: soil and environmental issues. *Advances in Agronomy*, 99:125- 182, 2008.

International Fertilizer Development Center (IFDC). 2016. Disponível em: <http://rootsforgrowth.com/food-nutrition-security>> Acesso em: 03 mai. 2016.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Disponível em: <http://www.Ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>. Acesso em: 12 jun 2016.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol. 4. 2006

ISHERWOOD, K. F. Mineral Fertilizer Use and the Environment. International Fertilizer Industry Association Revised Edition. Paris, February 2000.

KAMINSKI, João; PERUZZO, Geraldino. EFICÁCIA DE FOSFATOS NATURAIS REATIVOS EM SISTEMAS DE CULTIVO. Santa Maria-RS: Núcleo Regional Sul da Soc. Brás. de Ciência do Solo, 1997. Disponível em: <[http://www.dpv24.iciag.ufu.br/new/dpv24/Apostilas/Efic.Fosfatos Naturais 04.pdf](http://www.dpv24.iciag.ufu.br/new/dpv24/Apostilas/Efic.Fosfatos%20Naturais%2004.pdf)>. Acesso em: 26 jun. 2015.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. *Estudos Avançados*, v. 24, n. 68, 2010.

KORNDÖRFER, G. H. Resposta da cultura da cana-de-açúcar à adubação fosfatada. *Informações Agrônomicas*, Piracicaba, v.102, p.7, 2003.

KORNDORFER, G.H. Fósforo na cultura de cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.) Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba: 2004. p. 290-306.

LANA, R.M.Q.; ZANÃO JÚNIOR, L.A.; LUZ, J.M.Q.; SILVA, J.C. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de cerrado. v.22. n.3. Brasília, *Horticultura Brasileira*: 2004. p. 525-528.

LANA, R.M.Q.; ZANÃO JUNIOR, L.A.; LUZ, J.M.Q.; SILVA, J.C. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de cerrado. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 22, n. 3, p. 525-528, 2004.

LAPIDO-LOUREIRO, Francisco E.; MONTE, Marisa Bezerra de Mello; NASCIMENTO, Marisa. Capítulo 7 – Agrominerais. In: LUZ, Adão B. & LINS, Fernando A. F. (Eds.). *Rochas e minerais industriais*. 2ª edição. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM. Rio de Janeiro, 2008.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KORNODÖRF, G.H.; PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 14, n. 2, p. 363-376, 2000.

LARSON, E. D. A review of life-cycle analysis studies on liquid biofuel systems for the transport sector. *Energy Sustainable Devel.* v. 2, p. 109–126, 2006.

LEAL, J.R.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X. & ROSSIELO, R.O.P. Potencial redox e pH: variação em um solo tratado com vinhaça. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v7, p.257-261, 1983.

LEAL, M. R. L. V. Evolução tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.) *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade*. São Paulo: Blucher, 2010, p. 561-575.

LIANG, Q. et al. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 92, n. 1, p. 21-33, 2012.

LIMA, Paulo César Ribeiro. FÁBRICA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS E PRODUÇÃO DE ETANOL NO NORTE FLUMINENSE. 2007. Disponível em: <[http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema16/H-Coord\\_Legislativa-Setex-Internet-2007\\_2286.pdf](http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema16/H-Coord_Legislativa-Setex-Internet-2007_2286.pdf)>. Acesso em: 26 jul. 2016.

LOPES, Alfredo Scheid. *Manual de Fertilidade do Solo*. Tradução e Adaptação: Alfredo Scheid Lopes. São Paulo: ANDA / POTAFÓS, 1989. 155p.

LUZ, A. B., ANDRADE, M. C. GASPAR, O. M., TOMEDI, P. e LARES, C. A. R. (2001) Agalmatolito-LAMIL. In: *Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil*, p.202-210,

Editores: João A. Sampaio, Adão Benvindo da Luz, Fernando F. Lins, Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 398p.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The averages and a prediction for 2020. *Biomass & Bioenergy*, Oxford, v. 9, n. 45, p. 582-595, 2008.

MACEDO, I. Situação atual e perspectivas do etanol. *Estudos Avançados*, v. 21, n. 59, 2007.

MACEDO, I.C. et al. Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2004.

MALAVOLTA, E. Manual de Nutrição Mineral de Plantas. São Paulo: Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E. Manual de Química Agrícola: Adubos e Adubação. São Paulo, Ceres, 1981. 596p.

MALAVOLTA, E.; PIMENTEL-GOMES, F.; ALCARDE, J. C. Adubos & adubações. São Paulo: Nobel, 2002. 200 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional de plantas. Piracicaba, POTAFOS, 1989. 201p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, A. S. de. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2a ed. Piracicaba: Potafós, 1997. p.231-305.

MANOCHIO, C. Produção de bioetanol de cana-de-açúcar, milho e beterraba: uma comparação dos indicadores tecnológicos, ambientais e econômicos. Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas-MG: 2014. 32 p. (Monografia de graduação em Engenharia Química).

MARQUES, M. O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: SEGATO, S. V. et al. (Org.). *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 369-375.

MATIOLI, C.S.; GUAZZELLI, M.A.N.; LAZO, M.E.P.; GAVA, D.A. Uniformidade de distribuição de vinhaça com caminhão-tanque. In: SEMINARIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4., Piracicaba, 1988. Anais. Piracicaba: Copersucar, 1988; p.249- 269.

MATIOLI, C.S.; MENEZES, J.A. Otimização dos sistemas de aplicação de resíduos líquidos na lavoura. In: REUNIAO TECNICA AGRONÔMICA, Piracicaba, 1984. Anais. Piracicaba: Copersucar, 1984. p.67-70.

MCCORMICK, 2010, A. C. G. Biotecnologia e desenvolvimento sustentável. *Estudos Avançados*, v. 24, n. 70, 2010.

MELAMED, R.; GASPAR, J. C., MIEKELEY, N. Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais. In: LAPIDOLOUREIRO, F. E. V.;

MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.) Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. p. 385-395.

MENDOZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B. & ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.201-207, 2000.

MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S. Nutrição mineral de plantas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 281-298.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). *Anuário Estatístico da Agroenergia: 2012*. [On-line] MAPA, 2013. Disponível em: <www.mapa.gov.br>. Acesso em: 22 fev. 2016.

Ministério de Minas e Energia (MME). 2009. Perfil dos Fertilizantes N-P-K. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P49\\_RT75\\_Perfil\\_dos\\_Fertilizantes\\_N-P-K.pdf/f2785733-90d1-46d5-a09e-62f94ca302ad](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P49_RT75_Perfil_dos_Fertilizantes_N-P-K.pdf/f2785733-90d1-46d5-a09e-62f94ca302ad)>. Acesso em: 24 set. 2016.

MOSIER, A.; SYERS, J. K.; FRENEY, J. R. Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment. Island Press, 2013.

NARDI, A.; BARBOSA, A. C.; FIORAVANTE, E. F.; CÂMARA, F. O.; SILVEIRA, I. L. Proposição de limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos de fontes fixas para a indústria de fertilizantes em nível nacional. 2004. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/198FC8A8/EmendaFertilizantes7oGT.doc>>. Acesso em: 07 out. 2015.

NASCIMENTO, M.; LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V. O potássio na agricultura brasileira: fontes e rotas alternativas. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.) Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. p. 305-335.

NASTARI, G. Capital estrangeiro cada vez mais forte. *AgroAnalysis*, Agroenergia, FGV/EESP, abr. 2010. Disponível em: <[http://www.agroanalysis.com.br/materia\\_detalhe.php?idMateria=825](http://www.agroanalysis.com.br/materia_detalhe.php?idMateria=825)>. Acesso em: 13 fev. 2016.

NEMECEK T., KÄGI T. & BLASER S. (2007) Life cycle inventories of agricultural production systems. Final report ecoinvent v2.0 No. 15. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.

NEMECEK T., SCHNETZER J., 2011. *Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems*, Agroscope.

NOVACANA. 2013. Fertilizantes minerais e orgânicos na produção da cana-de-açúcar. Disponível em: <<https://www.novacana.com/cana/fertilizantes-minerais-organicos-producao-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 25 set. 2016.

NUNES JUNIOR, D. Torta de filtro: de resíduo a produto nobre. *Revista Idea News*, Ribeirão Preto, v.8, p. 22-30, 2008.

OLIVEIRA, F. H. T.; ARRUDA, J. A.; SILVA, I. F. ALVES, J. C. Amostragem para a avaliação da fertilidade do solo em função do instrumento de coleta das amostras e de tipos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.973-984, 2007.

OLIVEIRA, M.W.; BARBOSA, M.H.P; MENDES, L.C., DAMASCENO, C.M. Nutrientes na palhada de dez cultivares de cana-de-açúcar. *STAB: açúcar, álcool e subprodutos*, Piracicaba, v.21, n.3, p.6-7, 2002a.

OLIVEIRA, M.W.; MENDES, L.C.; BARBOSA, M.H.P.; VITTI, A.C.; FARIA, R.O. Avaliação do potencial produtivo de sete variedades de cana-de-açúcar sob irrigação complementar. *Reunião brasileira de fertilidade do solo e nutrição de plantas*, 25.; *Reunião brasileira sobre micorrizas*, 9.; *Simpósio brasileiro de microbiologia do solo*, 7.; *Reunião brasileira de biologia do solo*, 4., 2002, Rio de Janeiro. Resumos expandidos. *FertBio 2002: Agricultura – bases ecológicas para o desenvolvimento social e econômico sustentado*. Rio de Janeiro: SBM; SBCS, 2002b.

OMETTO, A. R.; HAUSCHILD, M. Z.; ROMA, W. N.L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. *Int J Life Cycle Assess*, v. 14, p.236–247, 2009.

ORLANDO F.º, J. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S. & OLIVEIRA, E.A.M. (eds.). *Produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba: FEALQ/ USP, 1993. p.133-146.

ORLANDO FILHO, J.; SOUZA, I.C.; ZAMBELLO JR., L. Aplicação de vinhaça em soqueiras de cana-de-açúcar: economicidade do sistema caminhões-tanques. *Boletim Técnico Planalsucar*, v.2, n.5, p.1-35, 1980.

PAMPLONA, C. Proálcool: impactos em termos técnico-econômicos e sociais do programa no Brasil. 2ª edição. Belo Horizonte: Editora Sopro, 1984.

PARANHOS, S. B. (Coord.). *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, 1987.

PECEGE. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: fechamento da safra 2014/2015 e acompanhamento da safra 2015/2016. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 2015. 78 p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) como parte integrante do projeto Campo Futuro. ISSN 2177-4358

PENATTI, C.P.; CAMBRIA, S.; BONI, P.S.; ARRUDA, F.C. DE O.; MANOEL, L.A. Efeitos da aplicação de vinhaça e nitrogênio na soqueira da cana-de-açúcar. *Boletim Técnico Copersucar*, São Paulo (44):32-38. 1988.

POVEDA, Manuel Moreno Ruiz. *Análise Econômica e Ambiental do Processamento da Vinhaça com Aproveitamento Energético*. 2014. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Pós-graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba, Potafos, 1991. 343p.

RAMASWAMY V, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Solomon S, Qin D, Manning M et al.), New York: Cambridge University Press, 2007.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. Plantio de cana-de-açúcar: Estado da arte. 2. ed. Piracicaba: T.C.C. Ripoli, 2007. 198 p.

ROSOLEM, C.A. & NAKAGAWA, J. Residual and annual potassic fertilization for soybeans. *Nutr. Cycl. Agroecos.* 59:143-149, 2001.

ROSOLEM, C.A.; SANTOS, F.P.; FOLONI, J.S.S. & CALONEGO, J.C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:1033-1040, 2006.

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F.; VITTI, A.C.; PRADO JÚNIOR, J.P.Q. Fósforo. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p.271-287.

Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB). 2011. RSB GHG Calculation Methodology. Disponível em: <https://www.scsglobalservices.com/files/standards/12-12-20-RSB-STD-01-003-01%20RSB%20GHG%20Calculation%20Methodology%20v2.1.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2016.

SAAB, A. A. e DE ALMEIDA PAULA, R.(2008). “O Mercado de Fertilizantes no Brasil – Diagnóstico e Proposta de Políticas”. Ministério da Agricultura e Abastecimento - MAPA.

SALLA, D. A.; CABELLO, C. Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca, cana-de-açúcar e milho. *Revista Energia na Agricultura*, 25(2): p.32-53, 2010.

SANTANA, S.S. Economicidade da aplicação de vinhaça em comparação a adubação mineral. *Álcool e Açúcar*, São Paulo, v. 5, n. 23, p. 26-38, 1985.

SANTOS, D.H.; TIRITAN, C.S.; FOLONI, J.S.S.; FABRIS, L.B. Produtividade de cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v.40, n.4, p. 454-5-461, 2010.

SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T.; DREON, G. Conversão e balanço energético de sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 8(1): 1-7, 2013.

SCHENBERG, A. C. G. Biotecnologia e desenvolvimento sustentável. *Estudos Avançados*, v. 24, n. 70, 2010.

SCHLINDWEIN, J.A. Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto. Porto Alegre, UFRS, 2003. 169 p. (Tese de doutorado).

SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O. Utilização de nitrogênio de adubos verdes e mineral pelo milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, n. spe, p. 917- 926, 2000.

SENA, M.E.R. (1998). Aproveitamento do vinhoto como fertilizante e na geração de biogás através da combinação de processos com membranas e fermentação anaeróbica. [S.l.:s.n.]. Projeto submetido à FAPERJ - E26/171.524/98-RJ.

SILVA JUNIOR, C.A. E CARVALHO, L.A. (2010) - Alterações nos atributos físicos do solo relacionados a diferentes métodos de preparo no plantio da cana-de-açúcar. *Revista Alcoolbrás*, 129, 1: 42-45.

SILVA, T. R. B. da; REIS, A. C. de S.; MACIEL, C. D. de G. Relationship between chlorophyll meter readings and total N in crambe leaves as affected by nitrogen topdressing. *Industrial Crops and Products*, v. 39, p. 135-138, 2012.

SILVA, T. R. B.; LAVAGNOLLI, R. R.; NOLLA, A. Zinc and phosphorus fertilization of crambe (*Crambe abyssinica* Hochst). *Journal of Food Agriculture & Environment*, v. 9, p. 132-135, 2011.

SINCLAIR, T. R; HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Science*, v. 29, p. 90-98, 1989.

SIQUEIRA, J.O. *Biologia do Solo*. Lavras, ESAL/FAEPE, 1993.230p.

SOARES, L. H. B.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. Seropédica-RJ: Embrapa Agrobiologia, 2009. 14 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Agrobiologia).

SOUSA, Luciano Cunha de. O setor sucroenergético e sua dinâmica de inovação. 2015. 251 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Administração, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/18490/1/2015\\_LucianoCunhadeSousa.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/18490/1/2015_LucianoCunhadeSousa.pdf)>. Acesso em: 24 jun. 2016.

SPARKS, D.L. & HUANG, P.M. Physical chemistry of soil potassium. In: MUNSON, R.D., ed. *Potassium in agriculture*. Madison, American Society of Agronomy, 1985. p.201-276.

STEVENSON, F.J. *Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. Wiley-Interscience, 1986. 380p.

TAGLIALEGNA, G.H.F.; PAES LEME, M.F. e SOUSA, E.L.L. (2001) Concentration of the Brazilian fertilizer industry and company strategies. IAMA Congress, Sidney.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 5 ed. Porto Alegre: Artmed, 2012. 954p.

TOMAZ, H.V.Q. Fontes, doses e formas de aplicação de fósforo na cana-de-açúcar. 93 p. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009. Disponível em: <[www.agencia.CNPTIA.embrapa](http://www.agencia.CNPTIA.embrapa)>. Acesso: 18, out., 2014.

TRENKEL, M. E. Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture in Agriculture. Published by the International Fertilizer Industry Association (IFA), 2010.

TRENKEL, M.E., Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture in Agriculture. Published by the International Fertilizer Industry Association (IFA) Paris, France, 2010.

UHART, A. S; ANDRADE, F. H. Nitrogen deficiency in maize: I - Effects on crop, growth, development, dry matter partitioning and kernel sets. Crop Science, v. 35, p. 1376-1383, 1995.

UNCTAD - “TRACKING THE TREND TOWARDS MARKET CONCENTRATION: THE CASE OF THE AGRICULTURAL INPUT INDUSTRY, 2005. Disponível em: <[http://unctad.org/en/docs/ditccom200516\\_en.pdf](http://unctad.org/en/docs/ditccom200516_en.pdf)>. Acesso em: 23 ago. 2016.

União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA). Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-ACUCAR (UNICA). Key numbers of the Brazilian Sugar cane Industry: 2010/2011 harvest. [On-line] ÚNICA, 2011. Disponível em: <[www.unica.com.br](http://www.unica.com.br)>. Acesso em: 20 mar. 2016.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Produção de biocombustíveis - A questão do balanço energético. Revista de Política Agrícola, Brasília, DF, v. 14, p. 42-46, 2005.

VAN RAIJ, Bernardo. Fertilidade do Solo e Adubação. Piracicaba: Ceres / POTAFOS, 1991. 343 p.

VIEIRA, D. B. Fertirrigação sistemática da cana-de-açúcar com vinhaça. Álcool e Açúcar, v.6, n.28, p.26-30, 1986.

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M. S. Nutrição mineral de plantas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 299-325.

VITTI, G. C.; OLIVEIRA, D. B. de; QUINTINO, T. A. Micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V. et al. (Org.). *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 121-138.

VITTI, G.C. MAZZA, J.A.; LUZ, P.H.C.; QUINTINO, T.A. Manejo e uso de fertilizantes em cana-de-açúcar. In: Tópicos em tecnologia Sucroalcooleira. Editores Marcos Omir Marques et al., Jaboticabal: gráfica Multipress Ltda., 2006, p.31-53.

VON ELBE J.H. Colorantes. In: FENNEMA, O.W. Química de los alimentos. 2.ed. Zaragoza : Wisconsin - Madison, 2000. Cap.10, p.782-799.

WALTER, A.; DOLZAN, P.; QUILODRÁN, O.; GARCIA, J.; DA SILVA, C.; PIACENTE, F.; SEGERSTEDT., A. A. Sustainability Analysis of the Brazilian Bio-ethanol. Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) British Embassy, Brasilia. Retrieved May 17, 2010, from [http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0811\\_Unicamp\\_A\\_sustainability\\_analysis\\_of\\_the\\_Brazilian\\_ethanol.pdf](http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0811_Unicamp_A_sustainability_analysis_of_the_Brazilian_ethanol.pdf), 2008.

WEIR, K.L.; ROLSTON, D.E.; THORBURN, P.J. The potential for N losses via denitrification between a green cane trash blanket. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, Canberra, v. 20, p. 169-175, 1998.

WEIR, K.L.; ROLSTON, D.E.; THORBURN, P.J. The potential for N losses via denitrification between a green cane trash blanket. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, Canberra, v. 20, p. 169-175, 1998.

ZANATTA, J. A. Emissão de óxido nitroso afetada por sistemas de manejo do solo e sistemas de manejo. 2009. 79 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

## ANEXO A – Parte da planilha de coleta de dados de produção de cana-de-açúcar (painel)

Seq	Operação	Insumos						
		Classe	Produto	V.U.	Und	Qtade	Und	R\$/ha
	<b>Preparo de solo</b>							
3	Calagem	Corretivos	Calcário	78,00	R\$/t	2,00	t/ha	156,00
1	Dessecação	Herbicidas	Glifosato + 2,4-D	66,00	R\$/dose	1,00	dose/ha	66,00
	Gradagem intermediária							
	Gradagem niveladora							
	Manutenção de estradas e carregadores							
2	Análise de solo							
	Subsolagem							
5	Transporte de Água							
6	Transporte de pré-mistura							
	Transporte de pessoal							
4	Gessagem	Corretivos	Gesso	130,00	R\$/t	1,00	t/ha	130,00
<b>Seq</b>	<b>Plantio</b>							
	Arrumação de mudas							
2	Carregamento de mudas							
	Despalha e corte de mudas							
	Distribuição de mudas							
	Repasso e recobrição							
3	Sulcação	Fertilizante	MAP	1.350,00	R\$/t	0,37	t/ha	499,50
	Transporte de mudas							
	Transporte de torta de filtro							
7	Transporte de Pré-mistura							
6	Transporte de Água							
5	Cobrição	Inseticidas	ent 800 WG+Rugby+Pri	422,00	R\$/dose	1,00	dose/ha	550,00
		Fertilizante	+Magnésio+Zinco+Mar	128,00	R\$/dose	1,00	dose/ha	
		Mudas	Mudas	63,36	R\$/t	20,00	t/ha	
4	Plantio mecanizado							1.267,28
1	Colheita mecanizada de mudas							
<b>Seq</b>	<b>Tratos culturais planta</b>							
	Carpa Repasse							
3	Aplicação Fertilizante	Fertilizante	Cloreto	1.060,00	R\$/t	0,27	t/ha	286,20
2	Quebra lombo							
5	Transporte de água							
4	Aplicação de herbicidas - Pos	Herbicidas	Combine	29,00	R\$/l	1,80	l/ha	127,10
		Herbicidas	Provence	535,00	R\$/kg	0,14		
1	Aplicação de herbicidas	Herbicidas	Velpar k	21,00	R\$/l	1,80	l/ha	86,40
		Herbicidas	Gamit 500	27,00	R\$/l	1,80	l/ha	
<b>Seq</b>	<b>Tratos culturais soca</b>							
4	Adubação de cobertura	Fertilizante	20-00-20	1.000,00	R\$/t	0,60	t/ha	600,00
8	Aplicação de maturador	Outros	Modus	91,50	R\$/l	0,80	l/ha	73,20
2	Calagem	Corretivos	Calcário	78,00	R\$/t	2,00	t/ha	156,00
6	Aplicação Cigarrinha e broca	Outros	Curbix + Certero	159,00	R\$/dose	1,00	dose/ha	159,00
7	Aplicação de Fungicida	Outros	Priori Xtra	80,00	R\$/l	0,50	l/ha	40,00
9	Aplicação de Inibidor de Florescimento	Outros	Ethrel	138,00	R\$/l	0,67	l/ha	92,46
5	Soltura cotésia	Outros	Cotesia flavipes	1,40	R\$/copo	12,00	copo/ha	16,80
	Transporte de água							
	Triplíce operação							
1	Aplicação de herbicidas	Herbicidas	hexazinona	65,00	R\$/kg	0,30	kg/ha	94,40
		Herbicidas	Provence	535,00	R\$/kg	0,14	kg/ha	
3	Gessagem	Corretivos	Gesso	135,00	R\$/t	1,00	t/ha	135,00
<b>Seq</b>	<b>Colheita</b>							
1	Corte mecanizado							
3	Transporte cana picada							
2	Transbordo							

## ANEXO B – Parte da planilha de coleta de dados de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol (usinas)

CUSTOS AGRÍCOLAS					
CUSTOS OPERACIONAIS	Maquinário	Mão de obra	Insumos (R\$/ha)	Total (R\$/ha)	Área (ha)
Formação do canavial					
Tratos culturais de cana soca					
Corte, carregamento e transporte (CCT)					
<b>CAPITAL IMOBILIZADO</b>					
	<b>Total (R\$)</b>				
Maquinário					
Benfeitorias agrícolas					
Sistema de irrigação					
Investimentos agrícola					
Conservação e seguros patrimônio					
<b>DESPESAS ADMINISTRAÇÃO AGRÍCOLA</b>					
	<b>Total (R\$)</b>				
Salários agrícolas					
Despesas diversas					
<b>CUSTOS INDUSTRIAIS</b>					
	<b>Total (R\$)</b>				
Insumos industriais	químicos				
	combustíveis, lubrificantes e				
	sacaria				
Salários da indústria	salários industriais				
Manutenção industrial na safra	materiais				
	serviços				
Despesas industriais	serviços e terceirizados				
	recursos administrativos				
Investimentos industriais	investimento para renovação				
	investimentos para expansão				
Depreciação industrial	depreciação industrial				
<b>TOTAL</b>					
<b>CUSTOS ADMINISTRATIVOS</b>					
	<b>Total (R\$)</b>				
Salários administrativos					
Pagamento de juros de curto prazo para capital de giro					
Pagamento de juros de longo prazo (financiamento)					
Despesas diversas					
<b>TOTAL</b>					

Detalhamento dos custos de formação do canavial	(R\$)
Montante gasto com tratos de cana planta na formação	
Montante gasto com mudas	
<b>Indicadores adicionais agrícolas</b>	<b>Montante (R\$)</b>
Custo com manutenção e conservação de estradas	
Custos com investimento em estradas	
Custo com manutenção do sistema de irrigação	

Comentários sobre custos e principais investimentos agrícolas

Comentários sobre custos industriais

Comentários sobre principais investimentos industriais

CUSTOS DE COMERCIALIZAÇÃO	Total (R\$)
Impostos e Taxas	
Frete, seguros e taxas de comercialização (Comercial e Logística)	
<b>TOTAL</b>	
<b>IMPOSTOS PREDIAIS E DE VEÍCULOS</b>	<b>Total (R\$)</b>
Montante gasto	