



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO
CURSO DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Terezinha Bezerra Albino Oliveira

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA DE FAZENDAS
CANAVICULTORAS UTILIZANDO ÍNDICES DE *MALMQUIST***

Florianópolis/SC
2014

Terezinha Bezerra Albino Oliveira

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA DE FAZENDAS
CANAVICULTORAS UTILIZANDO ÍNDICES DE *MALMQUIST***

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, para a obtenção do Grau de Doutora em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Cezar Bornia

Florianópolis/SC
2014

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Oliveira, Terezinha Bezerra Albino.

048a Avaliação da eficiência produtiva de fazendas canavicultoras utilizando índices de *Malmquist* /, Terezinha Bezerra Albino Oliveira; Orientador, Antonio Cezar Bornia. - Florianópolis, SC, 2014. 226p.

Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Inclui referências

1. Produtividade Total dos Fatores de Produção. 2. Análise Envolvória de Dados. 3. Custos de Produção de Cana. 4. Eficiências Técnica e de Escala. I. Bornia, Antonio Cezar. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

Terezinha Bezerra Albino Oliveira

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA DE FAZENDAS
CANAVICULTORAS UTILIZANDO ÍNDICES DE *MALMQUIST***

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutora” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Florianópolis, 31 de outubro de 2014.

Profa. Lucila Maria de Souza Campos, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Antonio Cezar Bornia, Dr.
Orientador - UFSC

Prof. Antonio Sérgio Coelho, Dr.
Membro - UFSC

Prof. Henri Stüker, Dr.
Membro - EPAGRI

Prof. Pedro Alberto Barbeta, Dr.
Membro - UFSC

Prof. Jair dos Santos Lapa, Ph.D.
Membro UFSC

Profa. Suely de Fátima Ramos
Silveira, Dra.
Membro - UFV

*“O que vale na vida não é o ponto de partida e sim
a caminhada. Caminhando e semeando, no fim
terás o que colher”.*

(Cora Coralina)

*Aos meus pais, José Cesário Albino (in memoriam)
e Constança Dutra Bezerra Albino, que, com amor,
trabalho e retidão de caráter, muito me ensinaram.*

*Ao meu marido, Mauro Wagner, ao qual devo uma
parcela de mais esta conquista, e aos meus irmãos,
que sempre estiveram presentes.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por ser sempre o meu guia.

À minha primeira Professora Constança Dutra Bezerra Albino, Mãe e educadora.

À Universidade Federal de Alagoas, pela minha liberação para o Doutorado.

À Universidade Federal de Santa Catarina, representada pelo Departamento de Engenharia de Produção, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao Professor Antonio Cezar Bornia, pela orientação coerente, pelas sugestões oportunas e objetivas e pelos ensinamentos durante o meu doutorado.

Ao Professor Carlos Ernani Fries, do DEPS/UFSC, por não ter medido esforços para colaborar, corrigir rumos e apresentar sugestões no que se referiu às abordagens “Análise Envoltória de Dados e Índice de Malmquist”.

À Professora Suely de Fátima Ramos Silveira e ao Alexandre Matos Drumond, do DAC/UFV, pela valiosa ajuda em várias etapas deste trabalho.

Aos Professores, examinadores, Antonio Sérgio Coelho, Henri Stüker, Jair dos Santos Lapa, Pedro Alberto Barbetta e Suely de Fátima Ramos Silveira, pelas contribuições científicas para o engrandecimento deste trabalho.

À Professora Ana Lúcia Miranda Lopes, do Departamento de Economia da Universidade Federal de Minas Gerais, por permitir que eu assistisse as suas aulas da disciplina “Análise Envoltória de Dados”.

Ao Professor Pedro Alberto Barbetta, do Departamento de Estatística da UFSC, pelas contribuições em trabalhos científicos.

Ao Professor Lailton Soares, do Centro de Ciências Agrárias da UFAL, pela presteza em me auxiliar nas análises dos dados.

Ao Christiano Nascif, Coordenador do Educampo/SEBRAE, pelo apoio ao longo de vários anos e pelo fornecimento dos dados indispensáveis à execução desta pesquisa.

Aos técnicos Jolberto A. Martins e Leandro da S. Almeida, respectivamente, da DASA e do Educampo-Cana/SEBRAE,

pelas discussões e pela disponibilidade de informações.

Ao meu marido, Mauro Wagner de Oliveira, pela significativa ajuda e pelo companheirismo de longo tempo.

À minha irmã, Constança Bezerra Albino Chaves, pela atenção, disponibilidade e pelo criterioso trabalho de revisão linguística.

À Yslene Rocha Kachba e à Olga Maria Formigoni C. Walter, pela amizade construída durante o curso e por saberem me ouvir nos momentos difíceis.

Aos amigos do curso de Engenharia de Produção, Cleci Grzebieluckas, Helio Ferenhof, Blênio C. S. Peixe e Adriana M.Miguel, pela convivência salutar.

À Rosimeri Maria de Souza (PPGEP/UFSC), pela presteza e apoio administrativo no decorrer do curso.

E a todos aqueles que não foram citados, mas, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino. **Avaliação da eficiência produtiva de fazendas canavieiras utilizando índices de Malmquist**. 2014. 226f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Cezar Bornia

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é avaliar a eficiência relativa de fazendas canavieiras utilizando-se índices de Malmquist. O estudo foi realizado juntamente com os produtores de cana-de-açúcar da Destilaria Serra dos Aimorés (DASA), em Aimorés, Minas Gerais. Os dados correspondentes a este estudo foram obtidos de planilhas técnico-financeiras do SEBRAE/MG-Educampo Cana; da DASA e de resultados de entrevistas estruturadas e não estruturadas. Foram analisadas 79 fazendas, sendo cinco canaviais de cada fazenda, cinco safras e cinco variedades de cana, totalizando 1.975 unidades observadas. Em razão de as fazendas terem tipos diferentes de adubos aplicados nas rebrotas da cana, estas foram divididas em dois grupos: Grupo 1, composto por 20 fazendas que aplicaram adubo orgânico nas rebrotas; e, Grupo 2, formado por 59 fazendas que usaram adubo químico nas rebrotas. Selecionaram-se variáveis comuns que caracterizaram adequadamente o desempenho das propriedades canavieiras. Assim, foram consideradas variáveis de entrada: área do canavial, calcário, adubo químico ou orgânico, herbicida e inseticida químico. Nos dois grupos, a variável de saída foi a produção de colmos industrializáveis. Os dados foram analisados utilizando-se estatística descritiva, análise de regressão, Análise Envoltória de Dados (DEA) e Índice de Produtividade de Malmquist (IPTF). Houve relação positiva entre a produtividade da lavoura e o lucro. Pela Análise Envoltória de Dados, verificou-se que, em média, 8,2% das unidades observadas tiveram desempenho ruim e 38%, desempenho ótimo. Apenas 14,3% das unidades observadas no Grupo 1 e 10% das do Grupo 2 tiveram ganhos no IPTF. Comparando os IPTF com o lucro das 79 fazendas, notou-se que, em ambos os grupos, pôde-se estabelecer dois subgrupos com desempenhos diferentes. Dessa forma, há necessidade contínua de aprimoramento das técnicas e dos sistemas de produção. Para tanto, as ferramentas da Engenharia de Produção podem ser úteis na aplicação de técnicas de gerenciamento que proporcionem execução controlada de cada etapa do processo, para otimizar o uso dos recursos, extraindo destes o máximo benefício ao longo do maior tempo possível, considerando a sustentabilidade socioeconômica e ambiental do sistema.

Palavras-chave: Produtividade Total dos Fatores de Produção. Análise Envoltória de Dados. Custos de Produção de Cana. Eficiências Técnica e de Escala.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino. **Evaluating the productive efficiency of sugarcane farms by using malmquist indices**. 2014. Florianópolis, 2014.

ABSTRACT

The research was conducted to evaluate the relative efficiency of sugarcane farms by using Malmquist indices. The study was conducted in conjunction with producers of the sugarcane consigned to Destilaria Serra dos Aimorés (DASA) in Aimorés, Minas Gerais. The data corresponding to this study were obtained from technical-financial spreadsheets of the SEBRAE / MG-Educampo Cana, from DASA and from the results of structured and unstructured interviews. Seventy-nine farms were analyzed, as being five reed stands of each farm, five harvests and five varieties of sugarcane, as totaling 1,975 units observed. Because the farms have different types of fertilizers applied to regrowth of the cane, they were divided into two groups: Group 1 comprised 20 farms that applied organic fertilizer in sprouts; and Group 2 consisting of 59 farms that used chemical fertilizer on regrowth. Common variables that adequately characterized the performance of the sugarcane farms were selected. Therefore, the following input variables were considered: reed stand, lime, chemical or organic fertilizer, herbicide and chemical insecticide. In both groups, the output variable was the production of industrialized stalks. Data were analyzed by using descriptive statistics, regression analysis, Data envelopment analysis (DEA) and Malmquist Productivity Index (IPTF). There was a positive relationship between crop productivity and profit. By data envelopment analysis, it was found that, on average, 8.2% of the observed units had poor performance and 38% had great performance. Only 14.3% of the units observed in Group 1 and 10% of those in Group 2 had gains in IPTF. When comparing the IPTF with profit of 79 farms, it was noted that, in both groups, it was possible to establish two subgroups with different performances. Thus, there is continuous need for improvement techniques and production systems. For both, the tools of the Production Engineering may be useful in application of management techniques that provide controlled execution of each stage of the process in order to optimize the use of resources, therefore extracting their maximum benefit over the possible longest time, as considering the socioeconomic and environmental sustainability of the system.

Key Words: Total Productivity of the Production Factors. Data Envelopment Analysis. Sugarcane Production Costs. Technical and Scale Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de seleção do portfólio bibliográfico sobre DEA e Índice de <i>Malmquist</i>	37
Figura 2 - Mostra do gestor de referências bibliográficas EndNote X5.	38
Figura 3 - Mostra do gestor de referências, EndNote X5, em Índice de <i>Malmquist</i>	39
Figura 4 - Estrutura organizacional do trabalho.	41
Figura 5 - Contribuição percentual da agricultura, indústria e serviço.	46
Figura 6 - Países produtores de cana-de-açúcar.	48
Figura 7 - Distribuição percentual da produção de cana-de-açúcar, safra 2012/2013, por região geográfica.	50
Figura 8 - Construção de uma fronteira eficiente, modelo DEA com RVE.	74
Figura 9 - Projeção das DMUs orientada a insumos.	79
Figura 10 - Projeção orientada a produtos.	80
Figura 11 - Movimento radial das DMUs.	82
Figura 12 - Diferenciações básicas entre os rendimentos de escala.	89
Figura 13 - Emparelhamento e progresso técnico entre dois períodos de tempo.	93
Figura 14 - Enquadramento metodológico da pesquisa.	107
Figura 15 - Procedimentos para a realização da pesquisa.	111
Figura 16 - Mapa do Brasil destacando-se a localização geográfica das propriedades avaliadas no estudo.	112
Figura 17 - Modelo de processo de produção das fazendas produtoras de cana-de-açúcar da Serra dos Aimorés.	116

Figura 18 - Relação entre produtividade e custo e produtividade e lucro do Grupo 1.....	134
Figura 19 - Relação entre produtividade e custos e produtividade e lucro do Grupo 2.....	136
Figura 20 - Tipos de retornos de escala de 100 DMUs (20 fazendas x cinco talhões), nas safras 2007 a 2011, Grupo 1.....	143
Figura 21 - Tipos de retornos de escala de 295 DMUs (59 fazendas x cinco talhões), nas colheitas de 2007 a 2011, Grupo 2.....	145
Figura 22 - Desempenho técnico, tecnológico e da PTF dos Grupos 1 e 2.....	157
Figura 23 - Análise de regressão das variáveis IPTF e variação do lucro referentes às DMUs dos Grupos 1 e 2.....	163
Figura 24 - Análise de regressão das variáveis IPTF e variação do lucro referentes às DMUs dos subgrupos 1 e 2 e dos subgrupos 3 e 4.....	164

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1** - Principais itens para implantação, condução e colheita de um canavial.....67
- Quadro 2** - Explicação das regiões de rendimentos de escala com base na Figura 12.....89
- Quadro 3** - Distribuição dos insumos usados no processo de produção (rateio dos itens).119
- Quadro 4** - Alocação das variedades de cana em função do ambiente de produção e época de colheita recomendada para as principais variedades de cana cultivadas na região da Serra dos Aimorés, MG.122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perfil do agronegócio brasileiro em relação ao total nacional.....	45
Tabela 2 - Distribuição da área de plantio de cana-de-açúcar, produção e produtividade do canavial por estado brasileiro, safra 2012/13.....	49
Tabela 3 - Precipitação pluvial mensal do período de janeiro de 2006 a julho de 2011, na microrregião da Serra dos Aimorés, MG.	126
Tabela 4 - Perfil dos canavicultores da Serra dos Aimorés.....	127
Tabela 5 - Estatística descritiva das variáveis usadas no estudo de um sistema de produção de cana-de-açúcar.....	130
Tabela 6 - Média das variáveis de entrada e saída, por ciclo, dos Grupos 1 e 2.....	131
Tabela 7 - Análise de regressão linear das fazendas que utilizaram adubo orgânico (Grupo 1) na adubação das rebrotas da cana-de-açúcar, no período de 2006 a 2011.....	133
Tabela 8 - Análise de regressão linear das fazendas que utilizaram adubo químico (Grupo 2) na adubação das rebrotas da cana-de-açúcar, no período de 2006 a 2011.....	135
Tabela 9 - Classificação das DMUs do Grupo 1 em relação aos escores de eficiência de escala por meio da abordagem DEA/RCE e DEA/RVE, nos ciclos de cana-planta à quarta rebrota.	139
Tabela 10 - Classificação das DMUs do Grupo 2 em relação aos escores de eficiência de escala por meio da abordagem DEA/RCE e DEA/RVE, nos ciclos de cana-planta à quarta rebrota.....	141
Tabela 11 - Sumário das médias dos índices de eficiências técnicas e de escala, do Grupo 1, calculadas por ano.....	142
Tabela 12 - Sumário das médias dos índices de eficiências técnicas e de escala, do Grupo 2, calculadas por ano.....	142

Tabela 13 - Principais <i>benchmarks</i> , do Grupo 1, para as fazendas ineficientes no período de 2006 a 2011 (cana-planta à quarta rebrota da cana), considerando retorno variável de escala de produção.	147
Tabela 14 - Principais <i>benchmarks</i> , do Grupo 2, para as fazendas ineficientes no período de 2006 a 2011 (cana-planta à quarta rebrota da cana), considerando retorno variável de escala de produção.	149
Tabela 15 - Eficiência técnica nos modelos RCE e RVE, da Fazenda 1, na rebrota dos cinco talhões, nos tempos anterior e atual da colheita da cana-de-açúcar.	152
Tabela 16 - Índices de variação da PTF, da variação das eficiências técnica, pura, tecnológica e de escala de produção entre as rebrotas dos cinco talhões de cana da Fazenda 1, comparando-se o ano atual (t) com o anterior (t-1).....	153
Tabela 17 - Índices de variação da produtividade total dos fatores, das eficiências técnica, pura, de escala e tecnológica entre as rebrotas da cana-de-açúcar do Grupo 1.	154
Tabela 18 - Índices de variação da produtividade total dos fatores, das eficiências técnica, pura, de escala e tecnológica entre as rebrotas da cana-de-açúcar do Grupo 2.	155
Tabela 19 - Distâncias calculadas por programação linear das unidades analisadas, mudanças na eficiência técnica (ETG), mudança tecnológica (ET) e na produtividade total dos fatores (IPTF) para um conjunto de DMUs do Grupo 1 que contribuíram, em algum momento, para o deslocamento da fronteira de produção.....	158
Tabela 20 - Distâncias calculadas por programação linear das unidades analisadas, mudanças na eficiência técnica (ETG), mudança tecnológica (ET) e na produtividade total dos fatores (IPTF) para um conjunto de DMUs do Grupo 2 que contribuíram, em algum momento, para o deslocamento da fronteira de produção.....	161
Tabela 21 - Análise de regressão das variáveis IPTF e lucro dos quatro subgrupos que constituíram as DMUs dos Grupos 1 e 2.....	165

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATR	-	Total de Açúcares Recuperáveis
BCC	-	Banker, Charnes e Cooper
CCR	-	Cooper, Charnes e Rhodes
CCT	-	Corte, Carregamento e Transporte
CRS	-	Constant Returns of Scale
DASA	-	Destilaria Serra dos Aimorés
DEA	-	Data Envelopment Analysis
DMUO	-	Decision Making Unit (em observação)
EE	-	Eficiência de Escala
EMS	-	Efficiency Measurement System
EP	-	Eficiência Pura
ET	-	Eficiência Tecnológica
ETG	-	Eficiência Técnica Global
GAMS	-	General Algebraic Modeling System
GEE	-	Gases do Efeito Estufa
GHG	-	Green House Gas
GPS	-	Global Positioning System
IGP-DI	-	Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna
IPTF	-	Índice de Produtividade Total dos Fatores
K ₂ O	-	Óxido de Potássio
MC	-	Margem de Contribuição
N	-	Nitrogênio
P ₂ O ₅	-	Pentóxido de Fósforo
PCTS	-	Pagamento da Cana pelo Teor de Sacarose Aparente
PE	-	Ponto de Equilíbrio
PTF	-	Produtividade Total dos Fatores
RB	-	República do Brasil
RCE	-	Retorno Constante de Escala
RNC	-	Retorno Não Crescente
RND	-	Retorno Não Decrescente
RVE	-	Retorno Variável de Escala
STATA	-	Data Analysis and Statistical Software
TFP	-	Total Factor Productivity

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	28
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	32
1.3 JUSTIFICATIVA	33
1.3.1 Motivação e Relevância.....	35
1.3.2 Originalidade	36
1.4 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DO TRABALHO	40
2 REFERENCIAL TEÓRICO	43
2.1 O <i>AGRIBUSINESS</i> E A AGROINDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA	43
2.1.1 Síntese Histórica e Evolução da Cana-de-Açúcar.....	46
2.1.2 As Especificidades do Agronegócio da Cana-de-Açúcar	47
2.1.3 Importância Social do Setor Sucroenergético	51
2.1.4 Aspectos Ambientais do Setor Sucroenergético	52
2.1.5 Atividades e Insumos Utilizados no Processo de Implantação e Condução dos Canaviais	55
2.1.6 Planejamento e Gestão.....	55
2.1.7 Área Disponível para o Plantio da Cana	58
2.1.8 Preparo do Solo para o Plantio da Cana	58
2.1.9 Mudanças de Cana	60
2.1.10 Adubação Verde	61
2.1.11 Condução do Canavial	62
2.1.12 Colheita dos Colmos e o Pagamento da Cana	64
2.1.13 Avaliação de Desempenho do Setor Sucroenergético.....	68
2.2 ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA) E ÍNDICE DE <i>MALMQUIST</i>	69
2.2.1 Conceituações Básicas e Origem da Análise Envoltória de Dados.....	70

2.2.2	Princípios Fundamentais da Análise Envoltória de Dados ...	70
2.2.3	Avaliação da Eficiência pela Abordagem DEA.....	75
2.2.4	Modelos Básicos de Análise Envoltória de Dados	81
2.2.5	Eficiência de Escala.....	87
2.2.6	Índice de Produtividade de <i>Malmquist</i>	90
2.2.7	Características e Limitações da Análise Envoltória de Dados	95
2.2.8	Etapas de Implementação de DEA	96
2.2.9	Estudos de Aplicações de DEA no Setor do Agronegócio	98
2.2.10	Estudos de Aplicações de <i>Malmquist</i> no Setor do Agronegócio.....	103
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	107
3.1	ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO	107
3.2	PROCEDIMENTOS DA PESQUISA.....	110
4	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO DA SERRA DOS AIMORÉS.....	121
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	129
5.1	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DAS VARIÁVEIS DE <i>INPUTS</i> E <i>OUTPUT</i> DOS GRUPOS 1 E 2.....	129
5.2	EFICIÊNCIA TÉCNICA E DE ESCALA DAS 79 FAZENDAS POR MEIO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS.....	137
5.3	MEDIDAS DE VARIAÇÕES DA EFICIÊNCIA, POR MEIO DO ÍNDICE DE <i>MALMQUIST</i> , DOS GRUPOS 1 E 2.	151
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	167
6.1	CONCLUSÕES.....	167
6.2	LIMITAÇÕES E DIFICULDADES NA CONDUÇÃO DO ESTUDO.....	171
6.3	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS DE PESQUISA	172
6.4	PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTA PESQUISA	173

REFERÊNCIAS	177
APÊNDICES.....	207
APÊNDICE A - Aplicação de DEA à canavicultura: um exemplo simplificado utilizando o programa Solver	209
APÊNDICE B - Questionário aplicado aos técnicos e, ou, produtores de cana para auxiliar na coleta complementar de dados das propriedades canavieiras da Serra dos Aimorés.....	214
APÊNDICE C - Gráficos de dispersão das variáveis de <i>input</i> e <i>output</i> referentes à cana-planta e rebrotas da cana	218
APÊNDICE D - Resultantes das análises de correlação e dos componentes principais (principal component analysis – PCA) das variáveis de <i>input</i> e <i>output</i> referentes à cana-planta e rebrotas da cana	221
APÊNDICE E - Análise de Regressão Linear do Grupos 1 – 20 Fazendas	225
APÊNDICE F - Análise de Regressão Linear do Grupos 2 – 59 Fazendas	226

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o país com maior crescimento na produção mundial de cana-de-açúcar (GALLARDO; BOND, 2010; MARTINELLI, 2011). Este aumento deve-se, principalmente, à melhoria contínua da capacidade de produção e à instalação de novas unidades sucroenergéticas (STUPIELLO, 2005; NEVES; CONEJERO, 2007; CAMARGO, 2008; MARTINELLI, 2011). Na cultura da cana-de-açúcar, cada vez mais são adotadas diferentes tecnologias para aumentar a eficiência dos insumos, diminuir os custos de produção e elevar a produtividade da terra e dos recursos humanos, com vistas a tornar o sistema produtivo mais lucrativo e sustentável (BURNQUIST, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

No estado de Minas Gerais, a região da Serra dos Aimorés é uma das áreas tradicionais de produção de cana-de-açúcar, sendo contígua às outras áreas de produção de cana nos estados da Bahia e do Espírito Santo, que somadas alcançam cerca de 100 mil hectares. A região tem alta radiação solar e temperatura propícia ao desenvolvimento e maturação da cana, sendo comum, em anos com boa distribuição hídrica, a produtividade ultrapassar 120 toneladas de colmos industrializáveis, por hectare, e com produção de açúcar superior a 15.000 kg por hectare, igualando-se às áreas de maior produtividade no Brasil (OLIVEIRA *et al.*, 2007; KANEKO *et al.*, 2009; RAPASSI *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Na atualidade, a cultura da cana-de-açúcar no Brasil é uma das mais competitivas do mundo e o sucesso atual pode ser atribuído a diversos fatores, mas, possivelmente, a maior contribuição deve-se à ciência e à tecnologia desenvolvidas nas universidades brasileiras, nos centros de pesquisas e nas próprias unidades produtoras de açúcar e de álcool (OLIVEIRA *et al.*, 2007; GOLDEMBERG, 2007; MARTINELLI *et al.*, 2011; SILVA, 2011; RAIJ, 2011). As tecnologias de produção de cana, extração do caldo e fabricação do açúcar e do álcool têm forte impacto econômico e social (ALBUQUERQUE, 2009), uma vez que a cana é cultivada por pequenos, médios e grandes agricultores, totalizando, em 2012, área de cultivo de cerca de 9,7 milhões de hectares (IBGE, 2013) e, além disso, emprega de forma direta e indireta

grande número de pessoas com perfis diferentes (BRESSAN *et al.*, 2008; CAMARGO, 2008; KANEKO *et al.*, 2009; RAPASSI *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2012). A cultura da cana-de-açúcar também contribui para a melhoria do meio ambiente, devido à elevada taxa de fixação do CO₂ atmosférico pela fotossíntese, por período prolongado de tempo (ALMEIDA *et al.*, 2008; GARCIA; SPERLING, 2010; SUNDFELD; MACHADO, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2012), mitigando dessa forma os gases do efeito estufa. Além dessa importância ambiental, essa cultura destaca-se na produção do etanol, combustível denominado “limpo”, por ser derivado de fontes renováveis, que, em complementação ou substituição aos combustíveis fósseis, contribui para reduzir os efeitos do aquecimento global (GOLDEMBERG, 2007; GALLARDO; BOND, 2010; MARTINELLI, 2011).

De maneira geral, a liderança das empresas também deve estar associada à eficiência operacional e à sustentabilidade, visto que há fortes mudanças na economia mundial e na sociedade que apontam para a emergência de novos modelos de produção que podem ser qualificados de produção sustentável (FERREIRA, 2005; BRAGATO *et al.*, 2008; TORQUATO *et al.*, 2009; AMATO NETO, 2011) pois, ao serem alcançados, permitem obter produtos com menor consumo de recursos, e, por sua vez, levar a maiores resultados financeiros e econômicos (FERREIRA, 2005; TORQUATO *et al.*, 2009). Souza Filho (2007) classifica como sustentáveis as tecnologias que simultaneamente proporcionam conservação ambiental e sistemas socioeconômicos mais justos. Batalha e Silva (2000), Batalha *et al.*, (2005); Scarpelli (2007) sugerem aplicar técnicas de gerenciamento que proporcionem meios de executar cada etapa do processo de maneira controlada, para otimizar o uso dos recursos, extraindo destes o máximo benefício ao longo do maior tempo possível, considerando o retorno econômico que poderão proporcionar.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Para Lakatos e Marconi (2010) “o problema é uma dificuldade, teórica ou prática, no conhecimento de alguma coisa de real importância, para a qual se deve encontrar uma solução”.

Segundo Montgomery e Porter (1998), alguns dos problemas mais difíceis que os gestores enfrentam, além da concorrência, são os de suas próprias organizações, uma vez que exigem mudanças em parte ou

em toda a cadeia de valor. Para tanto, é essencial que se tenha a perfeita compreensão da estrutura e do desempenho dos setores, para que a empresa possa obter vantagem competitiva sustentável.

Tradicionalmente, a gestão na propriedade rural – especialmente aquela de menor porte –, é abordada de forma fragmentada e específica, e os trabalhos nesta área estão quase sempre restritos à apuração de custos e à análise contábil-financeira do empreendimento rural, limitando-se à apuração de receita, custos e lucros (BATALHA *et al.*, 2005).

A gestão de custos é considerada importante ferramenta para a sobrevivência de muitas empresas; entretanto, não é suficiente reduzir custos, é preciso administrá-los de modo a reforçar o posicionamento estratégico ao motivar a integração e a interação juntamente aos seus *stakeholders* (COOPER; SLAGMULDER, 1999). Os gestores, por sua vez, necessitam de instrumentos operacionais e conhecimentos básicos que avaliem a eficiência. Entretanto, Ferreira e Gomes (2009) citam que vários estudos científicos são complexos e de difícil aplicação fora do âmbito acadêmico ou técnico especializado, possivelmente pelo alto custo, longo tempo para gerar resultados e pela restrita flexibilidade de se adequarem às diversas situações reais. Conforme Machado (2007), grande parte dos agricultores brasileiros não tem acesso a ferramentas apropriadas de gestão. Da mesma forma, Batalha *et al.*, (2005) salientam que o baixo nível tecnológico, principalmente dos pequenos e médios agricultores brasileiros, não se explica apenas pela falta de tecnologia adequada, uma vez que, em muitos casos, mesmo quando a tecnologia está disponível, esta não se transforma em inovação, devido à falta de capacidade e condições para inovar.

O termo tecnologia refere-se ao conjunto de conhecimentos, especialmente científicos, que se aplicam a determinado ramo de atividade. Uma tecnologia constitui-se de diversos processos de produção, uma vez que esta envolve a combinação de diferentes insumos para transformá-los em produtos (FERREIRA; GOMES, 2009).

Em estudos conduzidos com produtores agropecuários do estado de Goiás, do Vale do Piranga em Minas Gerais, da região de Araraquara e São Carlos, no estado de São Paulo, e com produtores agrícolas do Alto Jacuí, no Rio Grande do Sul, foi constatada deficiência gerencial destes empreendimentos rurais. Em sua grande maioria, os produtores analisados não utilizam ferramentas adequadas às chamadas práticas gerenciais modernas (BATALHA *et al.*, 2005).

Gunduz *et al.*, (2011), ao avaliarem a eficiência alocativa de 97

fazendas de damasco em Malatya (Turquia), propuseram ações de reestruturação das fazendas, aperfeiçoamento no controle de custos e acesso do agricultor à informação via serviços de extensão e programas de treinamento, uma vez que muitos agricultores não adotavam as melhores tecnologias disponíveis ou as utilizavam de forma inadequada ou contentavam com métodos antigos de produção. Conforme estes autores, o incremento na produção poderia ser alcançado por meio do uso eficiente de tecnologias.

Torquato *et al.*, (2009) mencionam que as empresas rurais necessitam ser avaliadas do ponto de vista da eficiência que apresentam ao desempenharem essas atividades. No entanto, para avaliar *inputs e outputs* no processo de produção e melhoria da produtividade dessas propriedades, estes autores sugerem o uso de técnicas ou métodos que forneçam informações mais objetivas e precisas que as obtidas através da análise de rentabilidade e de indicadores financeiros, uma vez que há vários fatores externos que podem influenciar os resultados. Contudo, Ferreira e Gomes (2009) afirmam que é difícil avaliar o desempenho relativo de uma organização quando há múltiplos insumos e múltiplos produtos a serem considerados na análise de um sistema produtivo.

A Análise Envoltória de Dados (DEA) ou Teoria da Fronteira vem sendo muito utilizada em situações em que se propõe avaliar o desempenho de unidades organizacionais, em que a presença de múltiplos insumos e produtos dificulta a comparação (FERREIRA; GOMES, 2009). A DEA é um método da Pesquisa Operacional, cuja finalidade é construir uma fronteira – curva que delimita a máxima quantidade de produtos obtida em função dos insumos utilizados – conhecida como fronteira empírica, a qual se baseia em dados de produção observados, a partir dos quais avaliam-se a eficiência relativa de cada organização ou unidade produtiva observada, denominada *Decision Making Units* (DMUs) (KASSAI *et al.*, 2002; MELLO *et al.*, 2003; COOPER *et al.*, 2004; LINS; CALÔBA, 2006; ONUSIC *et al.*, 2007; FERREIRA; GOMES, 2009; SOUSA *et al.*, 2009). As organizações reais e virtuais, denominadas DMUs, podem ser unidades com ou sem fins lucrativos – realizam tarefas similares, porém independentes no que se refere à sua gestão, diferenciando-se nas quantidades de *inputs* que consomem e de *outputs* que produzem (GOMES; BAPTISTA, 2004; MELLO *et al.*, 2005; VILELA *et al.*, 2007; COOK; ZHU, 2008; SOUZA; MACEDO, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009; SOUSA *et al.*, 2009; REIS *et al.*, 2011).

No setor sucroenergético brasileiro, estudos conduzidos por

várias décadas em universidades e centros de pesquisas nacionais, assim como em empresas particulares, muito contribuíram para o avanço científico e tecnológico desse setor, uma vez que há décadas o país é referência internacional na produção competitiva de açúcar, álcool e coprodutos (GOLDEMBERG, 2007; MARTINELLI *et al.*, 2011; SILVA, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2012). Entretanto, as inovações tecnológicas são dinâmicas e há necessidade de verificar a eficiência e os custos de produção de cana, visando detectar pontos de estrangulamento para assegurar a liderança mundial do setor sucroenergético (NEVES; CONEJERO, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2013). No cultivo da cana-de-açúcar, as principais atividades adotadas são análise de solo, calagem e gessagem, adubações verde e orgânica, uso eficiente de fertilizantes químicos, escolha de variedades de cana produtivas e mais bem adaptadas a determinado ambiente, controle de pragas e plantas daninhas, irrigação e colheita na época correta (OLIVEIRA *et al.*, 2007; KANEKO *et al.*, 2009; RAPASSI *et al.*, 2009; RAIJ, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Outro importante indicador é a eficiência operacional que, ao ser alcançada, permite obter produtos com menor consumo de recursos, o que, por sua vez, pode levar a maior crescimento econômico com o uso de tecnologias “limpas” (TORQUATO *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2013). Assim, o gerenciamento da produção de cana requer ampla abrangência de informações de desempenho, uma vez que ela será tão mais produtiva e lucrativa quanto maior for o domínio do produtor sobre o processo produtivo e acerca das técnicas de execução e gerência (GOLDEMBERG, 2007; KANEKO *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Diante do exposto, a pergunta de pesquisa a ser abordada é *como avaliar o desempenho relativo de propriedades canavieiras considerando os aspectos multidimensionais inerentes à produção de cana-de-açúcar?* Dentre as técnicas que podem ser aplicadas para esta avaliação, destacam-se as abordagens DEA e Índice de *Malmquist*.

Ferreira e Gomes (2009) citam dois pontos fortes da DEA: O primeiro é que esta abordagem é a estrutura de produção gerada pelos dados, ou seja, se houver n unidades de decisão, a estrutura de produção é gerada pelos n vetores, sendo um vetor para cada unidade de decisão e cada vetor contém os valores dos insumos consumidos e dos produtos produzidos. Além da linearidade, são impostas algumas hipóteses muito pouco restritivas. O segundo ponto forte está centrado no processo de otimização, ou seja, cada unidade de decisão é comparada com os seus

pares. Esta comparação é com as que gastam menos ou igual e produzem igual ou mais. No entanto, estes autores ressaltam a necessidade de se ter bom conhecimento acerca dos fundamentos teóricos e matemáticos, além de conhecer as atividades que estão sendo avaliadas; condição fundamental para a escolha correta do modelo adequado e dos conjuntos de variáveis de entrada e de saída, uma vez que a falta desses conhecimentos pode levar à utilização inadequada dos modelos e a enganos na interpretação de seus resultados.

A natureza não estatística dos modelos DEA há muito foi reconhecida como limitação desse modelo. Entretanto, linhas de pesquisas iniciadas por Simar (em 1992) e Simar e Wilson (em 1998) combinam o método estatístico *bootstrapping* com DEA para gerar distribuições de frequência empíricas em avaliações de eficiência técnica de cada unidade observada (RAY, 2004; FERREIRA; GOMES, 2009). Estas pesquisas têm gerado grande interesse e, espera-se que, num futuro próximo, os *softwares* especializados em DEA contemplem o método *bootstrapping* para medir a eficiência de uma DMU (RAY, 2004), ao criar um intervalo de confiança de amplitude desejada para essas medidas (FERREIRA; GOMES, 2009).

Nos modelos básicos de DEA, as análises da eficiência técnica e de escala são modeladas para períodos individuais de tempo, ou seja, em períodos de tempos iguais. Porém, nos estudos de competitividade, é fundamental conhecer as mudanças técnicas e tecnológicas ao longo do tempo para, utilizando-se a mesma tecnologia, propor melhorias contínuas nos processos de produção e nos produtos (FERREIRA; GOMES, 2009; COSTA, 2012). Existe na literatura uma variedade de números-índice para analisar mudanças de produtividade entre períodos, dentre estes índices destaca-se o de *Malmquist* que não requer informações sobre preços (receitas e despesas), o que o torna preferido na análise de mudanças na produtividade total dos fatores (FÄRE *et al.*, 1994; LOVELL, 1996; LOVELL, 2003; FERREIRA; GOMES, 2009).

Desse modo, para responder à questão de pesquisa formulada, nesse estudo, propõe-se atender aos objetivos geral e específicos, expostos a seguir.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Com base no contexto do problema de pesquisa, objetiva-se neste estudo “avaliar a eficiência relativa de propriedades canavicultras

utilizando índices de *Malmquist*". Como função instrumental e intermediária para atingir o objetivo geral serão aplicados, em situações particulares, os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os principais insumos relacionados ao processo de produção de cana-de-açúcar.
- Selecionar, para o estudo, as variáveis que representam adequadamente o sistema de produção de cana-de-açúcar.
- Verificar, relativamente, a eficiência técnica e de escala das fazendas canavicultoras, utilizando modelos DEA.
- Avaliar as variações de eficiências técnicas e tecnológicas ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar, utilizando *Malmquist*.

1.3 JUSTIFICATIVA

Em um ambiente em que a competição tende a ser cada vez mais acirrada, avaliar o desempenho de organizações e intervir para eliminar as atividades que não agregam valor aos produtos são condições indispensáveis para que qualquer empresa moderna esteja em vantagem perante a concorrência (BORNIA, 2009).

Na canavicultura, para se atingir um desenvolvimento sustentável (financeiro e socioambiental), é imprescindível associar eficiente gerenciamento das atividades envolvidas na implantação e condução do canavial (ANDRADE; ANDRADE, 2007; RAPASSI *et al.*, 2009; SILVA, 2011; RAIJ, 2011), com a ciclagem de resíduos industriais e preservação do solo e dos recursos hídricos (PRADO, 2005; OLIVEIRA *et al.*; 2007; ALBUQUERQUE, 2009).

Para Marion e Segatti (2012), os fatores próprios do campo, como dependência do clima, precibilidade dos produtos e ciclo biológico das culturas e criações, associados aos riscos de pragas e doenças, levam alguns empresários a deduzir que, por se tratar de uma atividade diretamente ligada à natureza, qualquer tipo de planejamento se torna desnecessário. A falta de interesse de planejamento e de controle das operações, tanto na agricultura quanto na pecuária, contribuiu para a escassez na produção literária direcionada à administração rural, tornando-se difícil encontrar material de apoio para produtores, estudantes e professores. Ademais, Belloni (2000) cita que não tem havido uniformidade na definição dos conceitos atribuídos ao termo desempenho de organizações e aos critérios que o compõem.

No entanto, em comparação com ferramentas convencionais, a abordagem Análise Envoltória de Dados é considerada uma das mais adequadas para avaliar a eficiência de organizações, uma vez que gera uma fronteira (linha) de eficiência de uma tecnologia produtiva que define o melhor desempenho observado e possível de ser alcançado nessa tecnologia (FERREIRA; GOMES, 2009). Para que uma organização se torne eficiente, ela deverá deslocar-se até à isoquanta poliangular – curva que corresponde à combinação de insumos que proporciona a mesma quantidade de produto final (BANKER; NATARAJAN, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009; PAULILLO; AZEVEDO, 2009). A eficiência relativa de dada DMU é então obtida a partir da distância radial entre essa unidade e sua projeção na fronteira. A Análise Envoltória de Dados consiste em encontrar a melhor DMU virtual para cada DMU da amostra. Caso a DMU virtual seja melhor que a original, ou por produzir mais com a mesma quantidade de insumos, ou por produzir a mesma quantidade de produtos com menos insumos, a DMU original é considerada ineficiente (GOMES, 1999).

A DEA trata-se de uma aplicação da Programação Linear que tem por finalidade estabelecer a eficiência relativa entre diferentes entidades independentes, contabilizando explicitamente entradas e saídas (BELLONI, 2000; FERREIRA; GOMES, 2009). Assim, a DEA possibilita definir estratégias destinadas ao *benchmarking* e compara as unidades entre si, identificando aquelas de melhor desempenho, que servirão como referência para as demais unidades, uma vez que essas parceiras de excelência espelham o padrão de eficiência que deve ser almejado pelas organizações ineficientes. Conforme Ferreira e Gomes (2009), essa abordagem atende às demandas de aplicação prática, sem perder o rigor da análise científica, além de contribuir efetivamente para as pesquisas acadêmicas.

A fim de visualizar as potencialidades, auxiliar na detecção dos fatores críticos de produção e para subsidiar nas decisões tomadas pelos gestores, com o propósito de aumentar a produtividade da cultura, esta pesquisa – que tem como objeto de estudo os canavicultores da região da Serra dos Aimorés – propõe avaliar a eficiência relativa de propriedades canavieiras da região utilizando as abordagens Análise Envoltória de Dados e Índice de *Malmquist*.

A escolha das abordagens DEA e *Malmquist* deveu-se à utilização dessas ferramentas, em diferentes estudos, para avaliar a eficiência comparativa de qualquer organização considerada complexa. Ademais, por permitirem que os dados sejam avaliados na forma em que

foram coletados – sem compor uma média ou medida de dispersão para determinar uma fronteira de eficiência–, e por se considerarem os aspectos multidimensionais inerentes à produção de cana-de-açúcar, ao incluir diversas variáveis de *input* e *output*.

1.3.1 Motivação e Relevância

A motivação para realizar esta pesquisa deve-se à atuação profissional da autora ao longo de mais de uma década na área do agronegócio e, quanto à relevância do tema, nas últimas décadas, tem sido crescente o interesse pela cultura da cana-de-açúcar, pois a agroindústria canavieira do Brasil é de grande importância socioeconômica e ambiental para o país. Atualmente, a área colhida com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é de cerca de 9,7 milhões de hectares, sendo precedida apenas pela soja e pelo milho. Esse setor emprega de forma direta e indireta grande número de pessoas de diferentes classes sociais em quase todas as regiões do país, interiorizando o desenvolvimento e proporcionando aumento de divisas decorrentes das exportações de açúcar e de etanol (GOLDEMBERG, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2012). A cana-de-açúcar tem excepcional capacidade para produzir açúcar e biomassa (GOLDEMBERG, 2010; AMORIM *et al.*, 2011; CERRI *et al.*, 2013), superando grandemente outras culturas usadas para essa finalidade, como a beterraba açucareira, sorgo sacarino, milho, *miscanthus* e girassol (PIMENTEL; PATZEK, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2007; SMEETS *et al.*, 2009; SOUZA *et al.*, 2013).

Essa cultura destaca-se na produção do etanol (álcool etílico) e apresenta vantagens em relação ao petróleo por originar de fonte de energia renovável, uma vez que é produzida a partir da biomassa da cana e poluir bem menos que os produtos derivados do petróleo, gás natural e do carvão, contribuindo para a redução dos efeitos do aquecimento global (GOLDEMBERG, 2007; GALLARDO; BOND, 2010; MARTINELLI, 2011). Cerca de 80% da produção brasileira de etanol tem como destino o uso carburante, 5% destinam-se ao uso alimentar, perfumaria e álcoolquímica e 15% para exportação (UNICA, 2013).

Mori *et al.*, (2009) e Souza Filho (2007) realçam a importância da pesquisa agrícola ao desenvolver tecnologias que mantenham ou aumentem a produtividade sem comprometer a sustentabilidade, bem

como as que identificam novos sistemas de produção, de maneira que a sustentabilidade possa ser ampliada sem prejudicar a produtividade. Assim, utilizar a Engenharia de Produção em atividades do agronegócio é fundamental para garantir os padrões de qualidade no processo, e, com base em técnicas e modelos de engenharia, avaliar com eficiência os resultados obtidos, bem como otimizar o uso dos recursos e propor melhorias em todo o sistema produtivo.

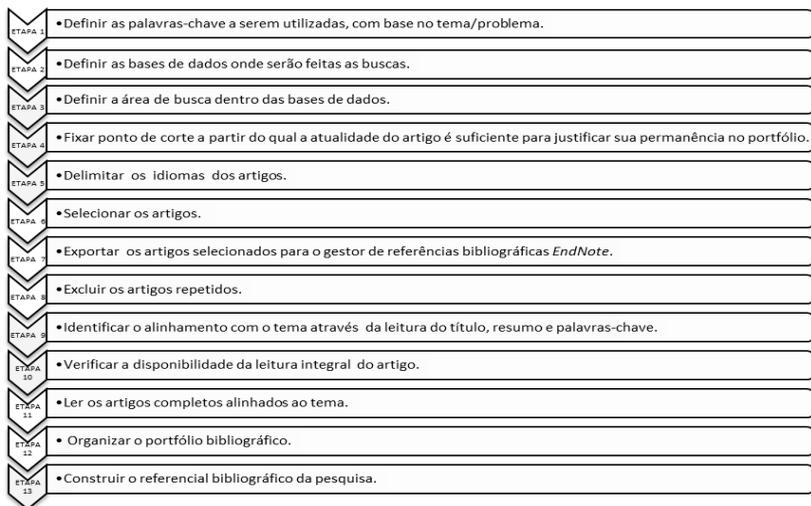
1.3.2 Originalidade

O sistema de produção de cana-de-açúcar empregado pelos fornecedores de cana da Destilaria Serra dos Aimorés (DASA) é semelhante ao adotado por quatro grandes empresas do setor sucroenergético localizadas ao Sul da Bahia, Nordeste de Minas Gerais e Noroeste do Espírito Santo. A área de cana contígua cultivada nessa região é superior a 100 mil hectares, não sendo encontrados trabalhos (tanto nessa região quanto no Brasil) com resultados que avaliassem a eficiência produtiva dos canavicultores, considerando o aspecto multidimensional do processo de produção dessa cultura.

Para mostrar o caráter original desta pesquisa, além das consultas em livros e em trabalhos publicados por meio de congressos científicos (nacionais e internacionais) e em teses e dissertações, foram feitas buscas e revisões sistemáticas em bases científicas de dados, cujos autores usaram DEA e Índice de Produtividade de *Malmquist* em suas pesquisas. Com base na metodologia de Ensslin *et al.*, (2011), são mostradas na Figura 1 as etapas do processo de seleção do portfólio bibliográfico para a construção do referencial teórico sobre *Data Envelopment Analysis* (DEA) e Índice de *Malmquist*.

As palavras-chave ou termos de busca foram escolhidos com base no tema e no problema de pesquisa. Nesta pesquisa, definiram-se os seguintes termos de busca: *Data Envelopment Analysis*; *DEA*; *Data Envelopment Analysis AND Agribusiness*; *Data Envelopment Analysis AND Agrobusiness*; *Data Envelopment Analysis and Agriculture*; *Data Envelopment Analysis AND Sugarcane*; Análise Envoltória de Dados; Análise de Envoltória de Dados; Índice de *Malmquist* e *Malmquist Index*. É oportuno ressaltar que os termos de busca foram colocados entre aspas (“...”), bem como adicionados nos campos localizados nos *sites* de pesquisa, “*or*” e “*and*”, palavras que podem ampliar ou refinar os resultados.

Figura 1 - Processo de seleção do portfólio bibliográfico sobre DEA e Índice de *Malmquist*.



Fonte: Adaptada de Tasca *et al.*, (2010); Afonso *et al.*, (2011); Ensslin e Ensslin (2011); Lacerda *et al.*, (2012).

Foram consultadas 14 bases de dados nas áreas de ciências sociais aplicadas, engenharias e áreas correlatas à estas. Destas bases, optou-se por selecionar os artigos das bases *SciELO*, *ScienceDirect*, *Scopus* e *Web of Science*. A escolha dessas três últimas bases internacionais deveu-se ao grande número de trabalhos publicados nas áreas da Engenharia de Produção e áreas correlatas. A primeira, por abranger, em sua maioria, artigos nacionais.

Para esta pesquisa, decidiu-se fazer os seguintes refinamentos:

- Área: Engenharias III e Áreas Correlatas;
- Tipo de documento: Artigos, Livros e Revisões;
- Período de tempo: Indefinido;
- Idioma: Inglês, Espanhol e Português.

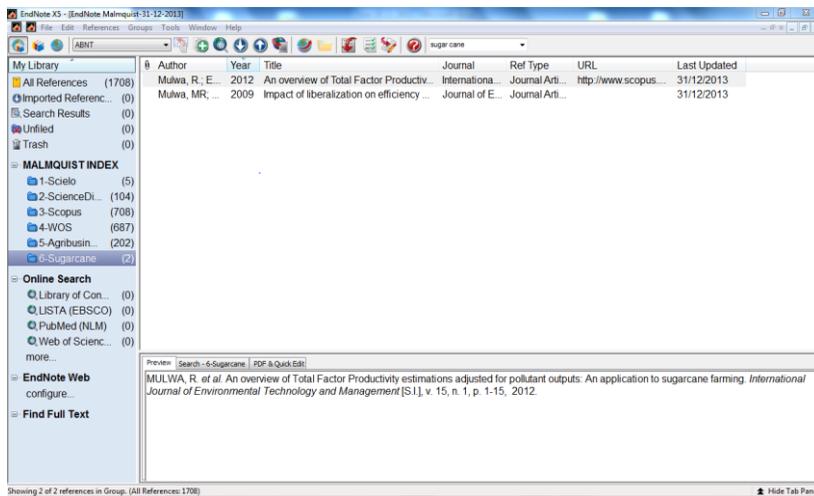
Os artigos encontrados nas quatro bases de dados foram exportados para o gestor de referências bibliográficas *EndNote X5*. A Figura 2 apresenta a tela principal deste programa. Por meio deste, além de poder excluir os artigos duplicados, foi possível ler o título, as palavras-chave e o resumo dos artigos. E, se de acordo com o tema da pesquisa, através do *EndNote*, pode-se, na maioria das vezes, acessar o

artigo completo em sua URL (*Uniform Resource Locator*).

Figura 2 - Mostra do gestor de referências bibliográficas EndNote X5.



Observa-se, à esquerda da Figura 2, que foram identificados 7.578 estudos nacionais e internacionais, cujos autores utilizaram Análise Envoltória de Dados em suas pesquisas. Desse total, em 1.708 trabalhos foram usados o Índice de Produtividade de Malmquist (Figura 3).

Figura 3 - Mostra do gestor de referências, EndNote X5, em Índice de *Malmquist*.

Dentre os 1.708 estudos, apenas dois foram direcionados ao setor sucroenergético, quais sejam:

Mulwa, M. R; Emrouznejad, Ali; Murithi, F.M (2009) avaliaram o impacto da liberalização de preços sobre a eficiência e a produtividade da indústria açucareira no Quênia. Utilizaram duas metodologias para estimativa de eficiência: Análise Envoltória de Dados (DEA) e fronteira estocástica. Os dados abrangeram o período de 1980-2000 (pré e pós-liberalização do controle governamental queniano na indústria açucareira). O teste para diferenças estruturais nos dois períodos não mostraram diferenças estatisticamente significativas entre os dois períodos. No entanto, ambas as metodologias indicaram declínio nos níveis de eficiência a partir de 1992, com o menor período experimentado em 1998. A partir de então, os níveis de eficiência começaram a aumentar.

Em 2012, Mulwa, R.; Emrouznejad, A.; Nuppenau, E. A (2012) mediram a Produtividade Total dos Fatores (PTF) em lavouras canavieiras no Quênia. Neste, ilustraram-se as diferenças entre as medidas de índice de *Malmquist* convencionais (em que a variável ambiente não esteve ajustada) e medidas de índice de *Malmquist* ajustadas ao ambiente usando funções distância, hiperbólicas direcionais e indicador *Luenberger*.

Em face do exposto, o que motivou esta investigação foi não

localizar na literatura nacional e internacional estudos que utilizassem DEA e Índice de *Malmquist* em propriedades canavieiras que abordassem, em extensas áreas e períodos, sistemas de produção de cana em diferentes ciclos de produção e com grande número de variáveis técnicas e econômicas. Assim, a aplicação dos modelos de Análise Envoltória de Dados e Índice de Produtividade de *Malmquist* tem alinhamento com as premissas desejáveis para esta pesquisa, uma vez que esta se inova ao possibilitar que as propriedades canavieiras tenham sua eficiência avaliada seguindo a ótica da quantidade de insumos e produtos envolvidos no processo de transformação.

1.4 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DO TRABALHO

Este relatório de Tese está organizado em seis capítulos:

Capítulo 1 – **Introdução:** apresenta-se o objeto de estudo, a importância da pesquisa, contextualiza o problema e a questão de pesquisa, traça os objetivos geral e específicos que nortearão a pesquisa, apresenta a motivação, justificativa e contribuições do estudo e, por fim, a originalidade do trabalho.

Capítulo 2 – **Referencial Teórico:** apresenta-se a fundamentação teórica relacionada ao tema deste estudo, a fim de alicerçar a pesquisa a ser desenvolvida.

Capítulo 3 – **Métodos de Pesquisa:** descrevem-se o enquadramento metodológico e os procedimentos da pesquisa.

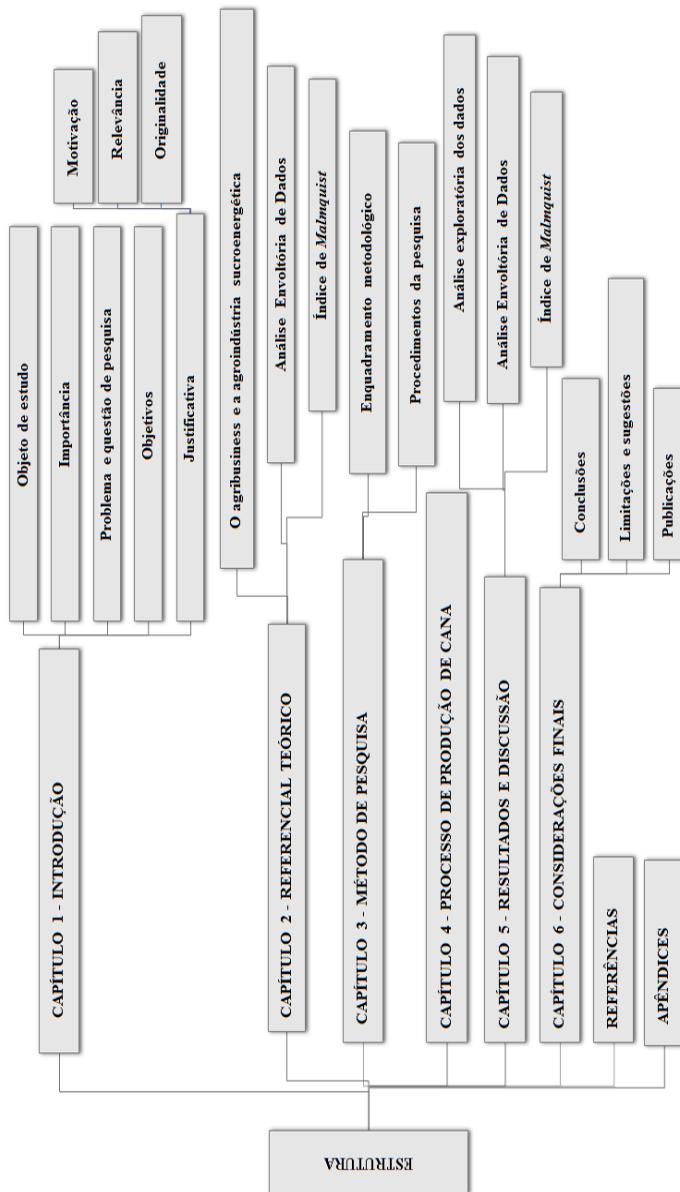
Capítulo 4 – **Processo de Produção:** caracteriza a região canavieira da Serra dos Aimorés.

Capítulo 5 – **Resultados e Discussão:** apresentam-se os dados e discutem-se os resultados da análise e da avaliação da eficiência relativa das propriedades canavieiras.

Capítulo 6 – **Considerações Finais:** destacam-se as conclusões da pesquisa, sugerem-se futuros trabalhos e citam-se as publicações decorrentes desta pesquisa.

A Figura 4 apresenta a sistematização desta tese, subdividindo-a e explicitando cada etapa.

Figura 4 - Estrutura organizacional do trabalho.



2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo divide-se em duas partes. Na primeira, subitem 2.1, são apresentados o *agribusiness* e a agroindústria sucroenergética. No qual se discorrem sobre a história da cana-de-açúcar; as especificidades da cultura da cana-de-açúcar; perfil socioeconômico e ambiental do setor; atividades, tecnologias e insumos utilizados para implantação e condução dos canaviais; e avaliação de desempenho do setor sucroenergético.

Na segunda parte, item 2.2, são abordadas as pesquisas sobre DEA e Índice de *Malmquist*. Nesse item, descrevem-se as conceituações básicas, origem e princípios fundamentais das abordagens; produtividade e eficiência de escala; modelos básicos; avaliação da eficiência pelo método DEA; índice de produtividade de *Malmquist*; características e limitações dos modelos DEA; etapas de implementação do modelo DEA; e, por fim, estudos de aplicações da DEA e do índice de *Malmquist* no agronegócio, assim como em outros setores.

2.1 O AGRIBUSINESS E A AGROINDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

O termo *agribusiness* teve sua origem na década de 1950, na Universidade de Harvard, pelos professores John Herbert Davis e Ray Allan Goldberg que, comparando o sistema agrícola ao de uma empresa, o definiram como a soma de todas as operações associadas à produção e distribuição de insumos agrícolas, operações realizadas nas fazendas, bem como ações de estocagem, processamento e distribuição de *commodities* agrícolas e itens fabricados a partir destas (ZYLBERSZTAJN, 2005; BATALHA; SILVA, 2007).

Em 1968, Ray Goldberg, ao considerar que as atividades são vistas de maneira interdependente do ponto de vista tecnológico, social e econômico, redefiniu o termo *agribusiness* como um sistema complexo que engloba os atores envolvidos com a produção, transformação industrial e distribuição de um produto, de forma que, neste sistema, estejam incluídos as políticas econômicas e setoriais, o mercado de

insumos agrícolas, a produção agrícola, as operações de estocagem, processamento, atacado e varejo, demarcando um fluxo que vai dos insumos ao consumidor final (ZYLBERSZTAJN, 2005).

No Brasil, o conceito de *agribusiness* foi introduzido na década de 1980, com a denominação de complexo agroindustrial (OLIVEIRA, 2010), sistema agroindustrial (SAG), negócio agrícola ou agronegócio (SAAB *et al.*, 2009). Entretanto, Batalha *et al.*, (2005) alertam para a diferença conceitual entre os termos Sistema Agroindustrial e Complexo Agroindustrial, ainda que às vezes usado de forma imprópria na literatura. Na conceituação destes, Sistema Agroindustrial é formado por Complexos Agroindustriais, e estes, por sua vez, são constituídos por Cadeias de Produção Agroindustriais.

A partir da segunda metade da década de 1990, o termo agronegócio, originado do *agribusiness*, começa a ser aceito e adotado nos livros-texto e nos jornais, culminando com a criação de cursos de especializações (*lato sensu*) e de cursos superiores de agronegócios, em nível de graduação e de pós-graduação universitária (ARAÚJO, 2007). Assim, o agronegócio é definido como o conjunto de atividades (relacionadas à agricultura e pecuária) advindas da fazenda ou de “dentro da porteira” – que representa a produção propriamente dita (além das grandes culturas, dentre outros, inclui o agroturismo) – e dos demais setores situados a montante da fazenda ou “antes da porteira” – constituídos pela indústria e comércio que fornecem insumos para a produção rural, como sementes, mudas, fertilizantes, agroquímicos, tratores e implementos, equipamentos de irrigação, embalagens etc. – e a jusante ou “depois da porteira”, que representa as etapas de beneficiamento, transporte, armazenamento, processamento ou industrialização, comercialização dos produtos agropecuários até o consumidor final (PINAZZA *et al.*, 1986; CASTRO *et al.*, 2002; BRUNO, 2010; OLIVEIRA, 2010). As atividades consideradas “antes da porteira” representam cerca de 11% do volume de recursos do agronegócio; as de “dentro da porteira”, cerca de 26%; e as “depois da porteira” são responsáveis por 63% do agronegócio brasileiro (OLIVEIRA, 2010).

Dessa base conceitual do agronegócio, no Brasil, surgiu o termo cadeia produtiva definida como um conjunto de partes inter-relacionadas de diversos sistemas produtivos, ou subsistemas do agronegócio, nos quais ocorrem a produção agropecuária e agroflorestal (CASTRO *et al.*, 2000). Conforme Zylbersztajn (1994); Batalha (1995); Castro *et al.*, (1995); Zylbersztajn (2000); Batalha e Silva (2007); Gasques *et al.*,

(2008); Salgado Junior *et al.*, (2009), a ideia de cadeia produtiva, termo em que aplica à sequência de atividades que transformam uma *commodity* em um produto pronto para o consumidor final, surgiu na França, na década de 1960, com a denominação de *filière*, e, no Brasil, os primeiros trabalhos sobre esta ótica datam da década de 1990.

A análise do agronegócio brasileiro (Produto Interno Bruto ou PIB do agronegócio) é feita para os setores agrícola e pecuário, com base, resumidamente, na soma de quatro segmentos: (a) Insumos para a agropecuária; (b) Produção agropecuária básica ou primária; (c) Agroindústria (processamento); e (d) Distribuição (CEPEA, 2013). Na Tabela 1 encontra-se o perfil do agronegócio brasileiro, em 2013.

Tabela 1- Perfil do agronegócio brasileiro em relação ao total nacional.

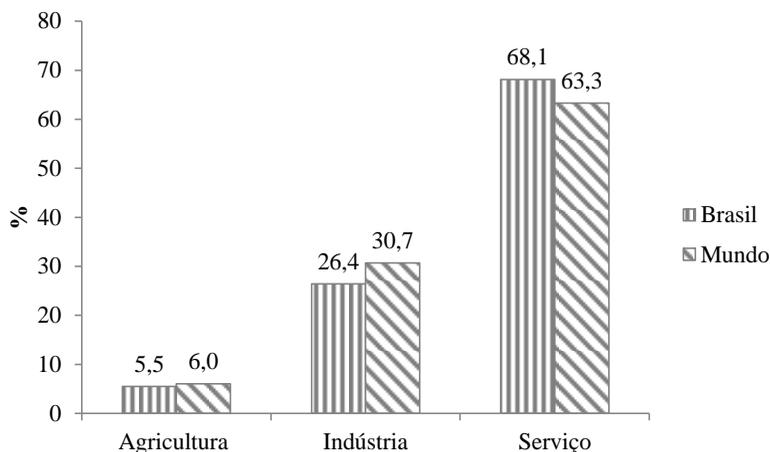
Descrição	Ano: 2013
PIB (agronegócio)	23%
Exportações (agronegócio)	41%
Importações (agronegócio)	7%
Área plantada	8%
População rural	15%

Fonte: Elaborado a partir dos dados da Conab, IBGE, Cepea-USP /Faemg/ Seapa/MAPA.

Com base nos dados expostos na Tabela 1, pode-se notar a extensão do agronegócio brasileiro, uma vez que este tem-se apresentado como relevante segmento na geração de emprego e renda, caracterizando-se, na média dos últimos anos, por crescimento superior ao da indústria e se tornando cada vez mais importante para o país (BREZZAN *et al.*, 2008; IBGE, 2013). Em 2012, a agricultura, denominada setor primário, representou 5,2% do PIB nacional, que foi de US\$2,3 trilhões, e a soma dos produtos desse setor em todos os países produtores representou 5,9% do PIB mundial, que foi de US\$83,2 trilhões, sendo, o Brasil, líder mundial na produção e exportação de vários produtos agrícolas como café, açúcar, etanol de cana-de-açúcar e suco de laranja (CONAB, 2013; IBGE, 2013).

Na Figura 5 são mostradas as contribuições percentuais do setor agrícola, industrial e de serviços no PIB brasileiro e mundial.

Dentro do contexto da cadeia do agronegócio, destaca-se a cana-de-açúcar, que ocupa posição de destaque na economia do Brasil, transformando-se na segunda cultura economicamente mais importante para o agronegócio brasileiro (UNICA, 2013), sendo precedida apenas pela cultura da soja (EMBRAPA/CNPQ, 2013).

Figura 5 - Contribuição percentual da agricultura, indústria e serviço.

Fonte: Elaborada a partir dos dados da CIA, 2013.

2.1.1 Síntese Histórica e Evolução da Cana-de-Açúcar

As diferentes espécies de cana-de-açúcar tiveram suas origens na Papua, em Nova Guiné, Oceania (canas nobres ou tropicais) e no Continente Asiático (canas indianas, japonesas e chinesas). A propagação dessa cultura ocorreu no norte da África e sul da Europa pelos árabes, na época das invasões. A partir do século VIII, os povos árabes disseminaram o cultivo da cana-de-açúcar nas margens do Mar Mediterrâneo, e os chineses participaram ativamente na disseminação da cultura nos países Filipinas e Java. Essa cultura foi introduzida nas Américas, em 1493, por Cristóvão Colombo, onde foi plantada em Santo Domingo, Região das Antilhas e, depois, levada para Cuba, México e Peru. Em 1502, proveniente de mudas da Ilha da Madeira, foi introduzida no Brasil na Capitania de São Vicente, hoje estado de São Paulo, pelo primeiro colonizador do Brasil, português Martim Afonso de Sousa. Em 1535, a cana-de-açúcar foi levada para Pernambuco, onde houve grande avanço da indústria açucareira, passando a ser, até 1954, o maior produtor nacional de açúcar (PLANALSUCAR, 1986; MONZAMBANI *et al.*, 2006; MAGRO; LACA-BUENDÍA, 2010). Contudo, a partir dessa data, até a atualidade, o estado de São Paulo lidera a produção nacional de cana-de-açúcar ([HTTP://WWW. COMCIENCIA.BR/](http://www.comciencia.br/)

COMCIENCIA, 2013).

Nos séculos XVI e XVII, a cana-de-açúcar era a principal riqueza do Brasil, quando a lavoura, a indústria e o comércio do açúcar alcançaram importantes progressos. No final do século XVII, o açúcar sofreu grande crise, em decorrência da corrida do ouro e das pedras preciosas de Minas Gerais, e esta foi agravada pela concorrência de mercado, devido à produção das Antilhas (América Central). Mas, um século depois, com o declínio da mineração, ressurgiram os engenhos e, no século XIX, teve início à modernização da indústria, com a introdução de máquinas a vapor (PLANALSUCAR, 1986).

A cana-de-açúcar é uma gramínea que possui, quando amadurecida, grande teor de açúcares – aproximadamente 1/3 da matéria seca dos colmos (UNICA, 2013). As canas plantadas no mundo inteiro são híbridas de variedades botânicas; entretanto, convencionou-se denominá-las “variedades” e são codificadas por letras e números, dando-lhes nomes compostos de siglas da instituição (federal, estadual ou privada) que efetuou o cruzamento, do ano em que este foi realizado e um número sequencial das seleções das variedades (<http://www.comciencia.br/comciencia>, 2013). Cita-se, como exemplo, a variedade de cana RB867515 (“RB” cruzamento da variedade obtido pelo centro de pesquisa de uma universidade federal brasileira; “86”, ano em que se iniciou o cruzamento; “7515”, número sequencial identificador da variedade).

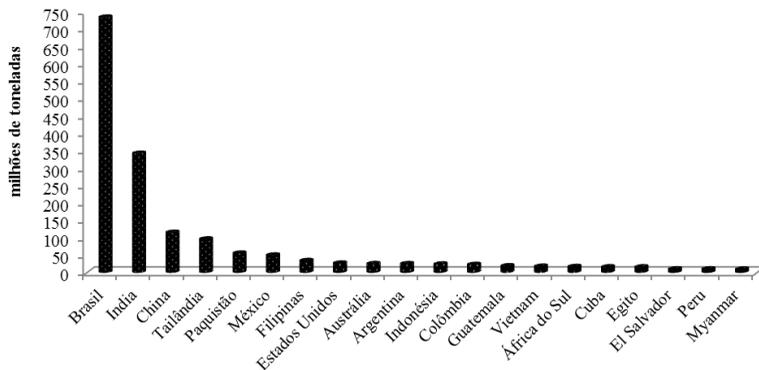
Atualmente, 60% da área cultivada com cana-de-açúcar é ocupada com cultivares RB (inicialmente República do Brasil e, agora, RIDESA Brasil) liberadas pelo Programa de Melhoramento Genético da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA). Este Programa foi criado com a finalidade de incorporar as atividades do antigo Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar (PLANALSUCAR), vinculado ao Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), órgão do Ministério da Indústria e do Comércio (OLIVEIRA *et al.*, 2012). A RIDESA é constituída por 10 Universidades Federais: UFPR, UFSCar, UFV, UFRRJ, UFMT, UFG, UFS, UFAL, UFRPE e UFPI (RIDESA, 2012).

2.1.2 As Especificidades do Agronegócio da Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura que se destaca pelo alto valor econômico, cuja produção mundial gira em torno de 1,66 bilhão de

toneladas por ano (FAO, 2013), e, neste cenário mundial, o Brasil é considerado o maior produtor (CNA, 2013; IBGE, 2013). Na Figura 6 são mostrados os países produtores de cana-de-açúcar e a classificação de acordo com as toneladas de cana produzidas.

Figura 6 - Países produtores de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaborada a partir dos dados da FAO, 2013.

Na safra 2012/2013, o Brasil foi responsável por cerca de 44% da produção, seguido pela Índia (21%) e pela China (7%), sendo o primeiro na produção de açúcar e etanol, respondendo por quase metade do açúcar comercializado no mundo (FAO, 2013).

A liderança do Brasil vem sendo mantida principalmente em virtude da área cultivada, que é relativamente grande, dos elevados índices de produtividade alcançados nas principais regiões produtoras do país, atrelados a isso, em razão do aumento do desenvolvimento nacional de diversas tecnologias agrícolas, incluindo fertilidade do solo, alocação de variedades, manejo e tratos culturais, controle de pragas e plantas daninhas, sistemas de colheita e mecanização (OLIVEIRA *et al.*, 2007; GOLDEMBERG, 2007; MARTINELLI, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2011; CONAB, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2013), além do aumento da capacidade das unidades produtivas e da instalação de novas unidades (STUPIELLO; 2005; CAMARGO, 2008). Assim, o Brasil é o país com maior crescimento na produção mundial de cana-de-açúcar (NEVES; CONEJERO, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2013). Contudo, em 2011, a cana-de-açúcar ocupava menos de 3% de terras brasileiras agricultáveis, uma área quase 20 vezes inferior à usada como pastagens, que era de aproximadamente 180 milhões de hectares (JANK, 2011).

Os estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Paraná participam com 76,44% da área cultivada com cana e 81,52% da produção nacional de cana-de-açúcar, havendo destaque para o estado de São Paulo com 53,13 e 56,23% de participação da área e produção total de cana, respectivamente. Conforme dados do IBGE, CONAB, FAEMG/SEAPA, na safra 2012/2013, do total da produção de cana destinado à indústria sucroenergética, 49,7% destinaram-se à produção de açúcar e 50,3% à produção de etanol.

Atualmente, as áreas de plantio de cana-de-açúcar concentraram-se principalmente nas Regiões Centro-Sul e Nordeste do país. A distribuição da área de plantio de cana-de-açúcar, produção e produtividade do canavial por estado brasileiro, na safra 2012/13, encontra-se na Tabela 2.

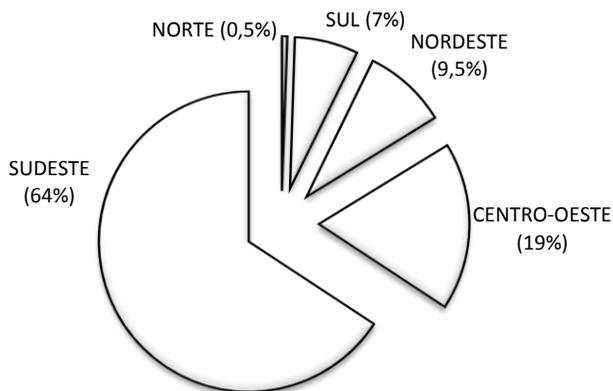
Tabela 2 - Distribuição da área de plantio de cana-de-açúcar, produção e produtividade do canavial por estado brasileiro, safra 2012/13.

UF	Área colhida (em mil ha)	Participação na área total (%)	Produção (em mil t)	Participação na produção (%)	Produtividade (t/ha)
SP	5.150,46	53,13	367.450	56,23	71,34
GO	732,87	7,56	62.018	9,49	84,62
MG	871,56	8,99	61.042	9,34	70,04
PR	655,51	6,76	42.216	6,46	64,40
MS	558,66	5,76	41.496	6,35	74,28
AL	433,30	4,47	21.652	3,31	49,97
MT	246,30	2,54	16.989	2,60	68,98
PE	299,90	3,09	15.130	2,32	50,45
PB	125,99	1,30	5.150	0,79	40,88
ES	73,46	0,76	3.770	0,58	51,32
BA	117,91	1,22	3.206	0,49	27,19
TO	27,41	0,28	2.334	0,36	85,17
SE	50,25	0,52	2.276	0,35	45,29
MA	49,53	0,51	2.206	0,34	44,54
RN	71,30	0,74	2.158	0,33	30,27
RJ	117,89	1,22	2.008	0,31	17,03
PI	15,63	0,16	851	0,13	54,45
PA	13,37	0,14	819	0,13	61,28
AM	4,43	0,05	269	0,04	60,69
RO	3,80	0,04	188	0,03	49,49
CE	40,25	0,42	129	0,02	3,21
AC	2,96	0,03	89	0,01	30,05
RS	30,54	0,32	73	0,01	2,39

Fonte: Elaborada a partir dos dados da CONAB, 2013.

A Figura 7 ilustra os valores percentuais da produção de cana, por região brasileira.

Figura 7 - Distribuição percentual da produção de cana-de-açúcar, safra 2012/2013, por região geográfica.



Fonte: Elaborada a partir dos dados da CONAB, 2013.

Na safra 2012/13, foram cultivados cerca de 9,7 milhões de hectares em todo o país, a partir dos quais produziram-se aproximadamente 679.000.000 t de colmos de cana-de-açúcar, destinadas à produção de açúcar (demerara, cristal e o refinado) e etanol (anidro e o hidratado), com produtividade média de 70 t de cana por hectare (CONAB, 2013; UNICA, 2013). O etanol é representado pela soma da quantidade produzida de álcool anidro (combustível a ser adicionado à gasolina, isento de água) e álcool hidratado (combustível do veículo movido a álcool, como o próprio nome, que tem em torno de 7% de água).

Com base na experiência adquirida com o uso exclusivo do etanol em veículos, o combustível passou a ser utilizado na aviação – caso do avião agrícola “Ipanema” produzido pela EMBRAER (Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A) desde 2004 (www.aeroneiva.com.br). O etanol é também utilizado como combustível em motores *Flex-Fuel* (veículos equipados com sistema de gerenciamento do motor capaz de identificar com precisão a presença de gasolina e, ou, etanol no tanque de combustível do veículo e ajustar automaticamente a operação do motor para o combustível existente), em instalações industriais para geração de energia térmica e elétrica e como matéria-prima para a geração de hidrogênio, posteriormente utilizado em sistemas com

células de combustível, com o objetivo de gerar energia elétrica (UNICA, 2013).

2.1.3 Importância Social do Setor Sucroenergético

Na atualidade, o setor sucroenergético é propulsor de desenvolvimento, com expressiva dimensão social, ao considerar o elevado percentual de trabalhadores que atuam em consonância com a legislação trabalhista brasileira (BALSADI, 2007; BRAGATO *et al.*, 2008), e base de sustentação econômica do país, pois este setor conta atualmente (safra 2012/2013) com uma estrutura produtiva de 430 usinas e destilarias, 70 mil produtores de cana, 1,2 milhão de empregos diretos, com participação de US\$ 48 bilhões no PIB setorial e exportações de aproximadamente US\$ 15 bilhões (UNICA, 2013).

Na safra 2012/2013, a produção do complexo sucroenergético foi cerca de 39 milhões de toneladas de açúcar (30% para o consumo interno e 70% para exportação) e 24 bilhões de litros de álcool (42% de etanol anidro e 58% de etanol hidratado) (AGE/Mapa e SGE/Embrapa, 2013; CONAB, 2013). Nesse período, o valor nominal do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro foi de aproximadamente R\$4,79 trilhões, ou US\$2,395 trilhões, a um Dólar médio de R\$2,00 (UNICA, 2013). Porém, a participação do agronegócio no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro foi de 22,4%, sendo responsável por 39% do total das exportações brasileiras (MDIC, 2013) e 1/3 dos empregos formais, com destaque para o agronegócio sucroenergético que movimentou cerca de R\$ 56 bilhões (produção de cana, açúcar, etanol e bioeletricidade), incluindo exportações de aproximadamente R\$16 bilhões e vendas ao mercado interno acima de R\$40 bilhões, representando, portanto, aproximadamente 2% do PIB nacional, ou quase a totalidade da riqueza gerada em um ano por um país como o Uruguai (US\$ 39 bilhões). Em termos sociais, este setor se destaca como um dos que mais emprega no país, gerando em torno de 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos (MDIC, 2013, UNICA, 2013; CONAB, 2013).

Como qualquer outro processo produtivo, são encontrados alguns impactos negativos na cultura da cana-de-açúcar. Como exemplo, Guedes *et al.*, (2002); Vian e Belik (2003); Paulillo *et al.*, (2007); Marin *et al.*, (2008); Bragato *et al.*, (2008); Martinelli (2011) citam: ocupação e intensificação do uso da terra; degradação do solo e dos rios; uso da água pelas usinas sem retorno aos corpos d'água; oscilação do nível de

salário dos trabalhadores durante a safra, que é computado por produção, e, na entressafra, é utilizado o piso salarial; uso da terceirização na contratação dos cortadores; e da dinâmica do mercado de trabalho, ou seja, sazonalidade nos postos de trabalho, sujeita às especificidades do ciclo produtivo da cana. Contudo, conforme Bragato *et al.*, (2008), as conquistas obtidas pelo setor sucroenergético nos últimos anos no cenário internacional, como maior produtor mundial de açúcar e álcool, demandam novas posturas das usinas que integram a atividade canavieira, com produtos de alta qualidade, livres de agrotóxicos e obtidos sob condições consideradas socialmente e ambientalmente aceitáveis pela opinião pública.

2.1.4 Aspectos Ambientais do Setor Sucroenergético

A partir da década de 1980, o debate ambiental passou a ser fortemente influenciado pelo conceito de desenvolvimento sustentável. No setor agrícola, esse conceito aponta para uma nova direção do padrão tecnológico da agricultura e pode ser entendido como forma de aliar a eficiência econômica à eficiência socioambiental, exigindo mudanças de comportamento dos envolvidos na cadeia produtiva desse setor (GARSIDE, 2003; PAULILLO *et al.*, 2007).

Até os anos 1970, no Brasil, a cana-de-açúcar foi processada com o único objetivo de produzir açúcar; após esse período, o setor sucroalcooleiro passou por um processo de diversificação da industrialização, tornando-se possível também utilizar a matéria-prima para a produção de outros coprodutos, principalmente o etanol (BURNQUIST, 2011).

O Brasil destaca-se na produção do etanol, combustível denominado “limpo”, uma vez que deriva de fontes renováveis (da produção e uso do combustível originado da biomassa), que, em complementação ou substituição aos combustíveis fósseis, contribui para diminuir os efeitos do aquecimento global (GOLDEMBERG, 2007; RISSARDI JÚNIOR; SHIKIDA, 2007; GALLARDO; BOND, 2010).

Perante este cenário, embora haja preocupação de vários pesquisadores quanto às implicações das mudanças no uso da terra em grande escala, ao considerarem que a monocultura pode trazer desvantagens sociais, econômicas e ambientais (GUEDES *et al.*, 2002; PAULILLO *et al.*, 2007; BRAGATO *et al.*, 2008; GALLARDO; BOND, 2010), a expectativa atual é a de que essa expansão da cultura

tende a continuar (CAMARGO, 2008), dentre outras demandas, impulsionada pela procura do etanol no mercado interno, em virtude do aumento do uso de carros movidos a álcool (LANA; GUIMARÃES, 2010).

Além da produção do etanol, durante a extração do caldo da cana são gerados aproximadamente 30% de bagaço – biomassa da cana-de-açúcar – que vem sendo aproveitado pelas usinas como fonte de energia na produção de calor industrial e de energia elétrica (MACEDO, 2004; MACEDO, 2007; PAULA *et al.*, 2009). O aproveitamento do bagaço e do excedente da palhada da cana-de-açúcar representa grande potencial como fonte renovável de energia, pois, além de serem usados em caldeiras para geração de calor e eletricidade durante o processo industrial do setor sucroenergético, há geração de excedentes de energia elétrica, os quais podem ser comercializados no mercado, com o propósito de complementar a demanda energética atual (que é predominante da energia hídrica) e alternativa aos derivados de petróleo e outros combustíveis fósseis (SOUZA; AZEVEDO; 2006; MACEDO, 2007a; GOLDEMBERG, 2008; GOES; MARRA, 2008).

Nas últimas décadas, as pesquisas científicas, aliadas aos avanços tecnológicos, a receptividade do setor pelas inovações e aos conceitos de desenvolvimento sustentável, transformaram a canavicultura em uma atividade que tem contribuído para a conservação do solo, gerando poucos resíduos e, ou, reutilizando-os no sistema de produção, por exemplo, a vinhaça, bagaço, torta de filtro, cinza de caldeiras etc. (ROSSETO, 2002; GOLDEMBERG, 2008; FARINA, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

No Brasil, as usinas sucroalcooleiras são autossuficientes em energia e produzem o correspondente a 3% (1.800 MW médios) da capacidade de geração brasileira (UNICA, 2013). Uma tonelada de bagaço de cana pode gerar aproximadamente 400 kWh e uma tonelada de palhada, 500 kWh. Considerando que o consumo médio de uma residência brasileira é de aproximadamente 150 kWh, a quantidade de bagaço e de palhada de cana produzida em um hectare pode abastecer oito residências durante um ano (OLIVEIRA, 2009).

A energia originária do bagaço da cana-de-açúcar tem seu maior potencial concentrado entre os meses de abril e novembro – época coincidente com a safra da cana-de-açúcar e com o período mais crítico para o sistema elétrico nacional, devido à pouca incidência de chuvas –, ou seja, quando o nível dos reservatórios das hidrelétricas diminui e são acionadas termoeletricas de alto custo econômico e ambiental que

utilizam como matéria-prima combustíveis fósseis, poluentes e formadores de gases do efeito estufa (GEE), como gás natural e carvão mineral (JANK, 2011; ZIMMERMAN, 2011). As emissões diretas de GEE estão associadas principalmente à liberação de CO₂ durante a queima do bagaço e fermentação do caldo da cana, mas essas emissões não são consideradas na quantificação dos GEE, porque o carbono liberado será novamente fixado pela vegetação (cana-de-açúcar) durante o próximo cultivo (GARCIA; SPERLING, 2010).

O principal aproveitamento do bagaço tem sido no processo de produção de energia (térmica e elétrica), conhecido como cogeração; porém, Souza e Azevedo (2006) realçam que o bagaço também é utilizado como composto na ração animal, fertilizante, biogás, matéria-prima para compensados e indústria química em geral, como combustível substituto da lenha. Existe uma nova tecnologia que está sendo aperfeiçoada no Brasil, denominada “etanol de segunda geração”, que é o uso do bagaço e da palhada para a obtenção do etanol biocelulósico ou bioetanol (BURNQUIST, 2011; GOES; MARRA, 2008; HOLLANDA, 2008) para substituir parte do diesel fóssil por o de cana-de-açúcar nos ônibus (30% de diesel vegetal, produzido a partir da cana-de-açúcar, e 70% de diesel mineral) (COPPE-UFRJ). Assim, esses resíduos tornaram-se matéria-prima nobre, uma vez que uma tonelada de cana contém energia equivalente a 1,2 barril de petróleo, pois cerca de 1/3 dessa energia está armazenada quimicamente no caldo (açúcares) e o restante encontra-se na biomassa da cana, aproximadamente metade no bagaço e metade na palhada da cana (HOLLANDA, 2008).

Estudos comprovam que a cinza do bagaço da cana tem potencial para ser utilizada como adição mineral, substituindo parte do cimento em argamassas e concretos, atendendo, portanto, à crescente demanda por tecnologia alternativa de construção segura, econômica e sustentável (ZARDO *et al.*, 2004; PAULA *et al.*, 2009).

A composição da matriz energética brasileira apresenta vantagem comparativa por utilizar parcela significativa de energia limpa e renovável, uma vez que, na atualidade, a cana-de-açúcar é a segunda maior fonte primária de geração de energia no país, sendo superada apenas pelo petróleo e seus derivados. Enquanto no Brasil a energia renovável representa mais de 45% da matriz energética do país, no mundo a média é de 13% nos países desenvolvidos e de apenas 6% nos países considerados ricos. Cerca de 17% dessa matriz vêm da cana-de-açúcar, por meio do etanol e da bioeletricidade (FINEP, 2010; GARCIA; SPERLING, 2010; ZIMMERMAN, 2011).

Na atualidade, a realização da colheita de cana sem a prévia despalha a fogo, em grandes áreas, tem contribuído para que haja maior retenção do carbono atmosférico no solo, uma vez que é mais lenta a mineralização dos restos culturais (OLIVEIRA, 2007). Estima-se que o corte mecanizado da cana-de-açúcar proporcione redução da ordem de 20% dos custos de produção, quando comparado com o corte manual. Contudo, o corte mecanizado da cana encontra-se, ainda, em estágio incipiente de mecanização ou com deficiências tecnológicas. Existem limitadores que restringem o corte mecanizado no Brasil, pois as soluções tecnológicas disponíveis não são suficientemente competitivas e o sistema ainda precisa ser aprimorado (BRAUNBECK; OLIVEIRA, 2006; EMBRAPA-CNPTIA, 2013).

Segundo Macedo *et al.*, (2004), ainda que durante o plantio, colheita, transporte, processamento e no uso dos produtos da cana-de-açúcar seja consumida grande quantidade de energia e gerados Gases do Efeito Estufa (GEE) ou Green House Gas (GHG), a agroindústria canavieira é apontada como importante atividade na produção de energia e, em consequência, na mitigação de GEE, em razão de os seus produtos energéticos serem utilizados em substituição aos combustíveis fósseis (derivados de petróleo e carvão) e ao gás natural.

2.1.5 Atividades e Insumos Utilizados no Processo de Implantação e Condução dos Canaviais

A cana-de-açúcar é cultivada em diversas regiões brasileiras, havendo algumas diferenças quanto às tecnologias e aos sistemas de produção adotados. Porém, em todas as regiões produtoras de cana-de-açúcar, são práticas comuns: amostragem do solo para a implantação do canavial; aplicação de corretivos de acidez do solo antecedendo ao preparo do solo; aração, gradagem e subsolagem; aplicação de adubo químico ou orgânico no fundo do sulco de plantio; escolha de variedades de cana-de-açúcar mais adaptadas à determinado ambiente edafoclimático; uso de herbicidas para controlar o mato; controle biológico da broca do colmo e da cigarrinha da raiz, pragas de ocorrência nacional; planejamento da colheita com base na maturação da cana; e uso de resíduos da indústria sucroenergética para adubar a própria cana-de-açúcar.

A seguir é apresentado um detalhamento dos itens e das atividades para a implantação e condução dos canaviais.

2.1.6 Planejamento e Gestão

O principal papel do administrador rural é planejar, decidir, controlar e avaliar os resultados de suas atividades agrícolas, visando manter a sustentabilidade econômica, social e ambiental do sistema (BATALHA *et al.*, 2005; SANTOS; MARION; SEGATTI, 2009). Conforme Marion e Segatti (2005), o planejamento permite ao empresário rural um resultado antecipado de cada atividade – nos planos estratégico, gerencial e operacional –, uma vez que propicia a administração a pensar no futuro de seus negócios, antecipando os problemas antes que eles aconteçam.

Os produtores, com visão empresarial, têm tido grande atenção com o controle orçamentário e financeiro, o que atualmente é muito facilitado pelo uso de planilhas eletrônicas. Para que o controle orçamentário e financeiro seja eficaz é necessário um sistema de informações gerenciais, que são definidos como normas e procedimentos (controles) que asseguram a exatidão e a veracidade dos registros contábeis e gerenciais, abrangendo toda a estrutura da empresa, possibilitando posteriormente o acompanhamento necessário para que os resultados sejam alcançados e as possíveis variações analisadas, avaliadas e corrigidas, com a finalidade de se atingir o resultado econômico-financeiro (MARION; SEGATTI, 2012). Essas mudanças têm transformado as fazendas de gestão familiar ou patriarcal em empresas familiares ou empresas rurais.

O planejamento das atividades envolvidas com a cultura da cana-de-açúcar, desde a escolha do sistema de produção e elaboração de orçamento até sua colheita, é extremamente importante para obter êxito na exploração econômica. A combinação entre clima, solo e fatores de produção determina a produtividade de um canavial. Portanto, é importante que os técnicos de campo iniciem os seus trabalhos com um bom planejamento e cronograma de implantação e condução de canaviais (ANDRADE; ANDRADE, 2007; MACHADO *et al.*, 2007; RAIJ, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2013). Dessa forma, a correta escolha dos insumos e a eficiência na realização das atividades de manejo deverão ser priorizadas desde as operações de cultivo até o transporte da cana para industrialização (PRADO *et al.*, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2007; RAPASSI *et al.*, 2009; BURNQUIST, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

O planejamento da lavoura é o detalhamento de cada uma das atividades a serem realizadas, incluindo: mapeamento da área produtiva;

divisão das fazendas em seções e, posteriormente, em talhões; definição dos ambientes de produção e alocação de variedades de cana; coleta de amostras de solos para avaliar a fertilidade do terreno; determinação de doses e dos tipos de insumos a serem utilizados; sistema de preparo e época de plantio da cana; aquisição de insumos para o plantio e condução do canavial; escalonamento da colheita por talhão e variedade; expectativa de produtividade; e contabilização dos custos, despesas e receitas (PRADO, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2007; KANEKO *et al.*, 2009; RAPASSI *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Normalmente, são realizadas análises e simulações para selecionar as técnicas a serem adotadas e escolhidos os insumos, máquinas e implementos, serviços, variedades de cana, distribuição destas nos tipos de solos, épocas de plantio, finalizando-se com a elaboração de um cronograma físico-financeiro. A eficiência na produção de cana será tanto maior quanto mais intenso for o sincronismo entre o cronograma das atividades e sua implementação em campo, principalmente devido aos fatores climáticos (OLIVEIRA *et al.*, 2007; RAPASSI *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Segundo Pinazza *et al.*, (1986); Oliveira *et al.*, (2007), Ripoli *et al.*, (2007), os principais fatores que definem a alocação das estradas e dos carregadores são os acidentes geográficos, as características físicas do solo e a rede viária. Os acidentes geográficos são as nascentes de água, os locais permanentemente alagados (brejos), as áreas de proteção ambiental, os rios, os vales e as montanhas. A rede viária regional – rodovias e ferrovias – tem traçado definido e não pode ser alterado pelo produtor rural, assim, estas redes têm sido utilizadas como fronteiras de seções ou talhões. Prado (2005); Ripoli *et al.*, (2007); Silveira *et al.*, (2007); Landell e Bressiani (2010) citam que, no setor canavieiro, quando do mapeamento da área produtiva, as áreas são agrupadas em 10 ambientes de produção de cana-de-açúcar: A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1 e E2, considerando-se o potencial de produção de cada um deles, os atributos químicos do solo e o clima local. O potencial de produção da cana, nos ambientes A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1 e E2, é respectivamente de: mais de 100; 96 a 99; 92 a 95; 88 a 91; 84 a 87; 80 a 83; 76 a 79; 72 a 75; 68 a 71 e menos de 68 toneladas de colmos industrializáveis por hectare.

2.1.7 Área Disponível para o Plantio da Cana

A área para o cultivo da cana pode ser própria (da usina, da destilaria e do produtor) ou arrendada. No caso de arrendamento, preferem-se terras próximas à usina (raio médio de 10 km), com topografia plana ou levemente inclinada e sem afloramento de rochas. Uma vez que, proximidade à usina ou destilaria diminui as despesas com o transporte dos colmos a serem industrializados e o tipo de topografia facilita a mecanização das práticas culturais e da colheita (ANDRADE e ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007). Considerando esses fatores, normalmente o arrendamento (R\$/ha) do terreno oscila entre 10 e 14 t de colmos por hectare (RIPOLI *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

2.1.8 Preparo do Solo para o Plantio da Cana

Nas últimas décadas mudou a história do setor canavieiro, uma vez que as pesquisas científicas, aliadas aos avanços tecnológicos, à receptividade do setor pelas inovações (ROSSETO, 2002) e aos conceitos de desenvolvimento sustentável (AMATO NETO, 2011) estão transformando a cultura canavieira em uma atividade que pode contribuir para a conservação do solo, ao gerar poucos resíduos e, ou, reutilizá-los no sistema de produção (como é o caso da vinhaça, bagaço, torta de filtro, cinza de caldeiras etc.). Assim, na indústria de açúcar e etanol, a incorporação de inovações tecnológicas e de sistemas de gestão tem exigido melhorias contínuas em toda a cadeia produtiva.

Nas Regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil os plantios de cana, sem irrigação, são realizados basicamente em duas épocas: setembro e outubro (início do período chuvoso) e fevereiro a março (final do período chuvoso). O canavial implantado no início do período chuvoso poderá ser colhido a partir de abril-maio do ano seguinte e, por isso, é designado “cana de ano”, mas, para o plantio de fevereiro a março, a colheita ocorrerá após cerca de 15 a 18 meses, sendo conhecida como “cana de ano e meio” (PINAZZA *et al.*, 1986; ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007; KANEKO *al.*, 2009).

Antecedendo a implantação do canavial, é prática rotineira coletar amostras de solo, e os resultados das análises são usados para determinar se o solo está ácido e, caso esteja, qual o tipo de corretivo de acidez deverá ser empregado e a sua respectiva dosagem (OLIVEIRA *et*

al., 2007; RAPASSI *et al.*, 2009; RAIJ, 2011). O calcário é uma rocha carbonatada finamente moída, que, quando aplicada ao solo, neutraliza a acidez e fornece nutrientes para as plantas. Juntamente com o calcário, aplica-se também gesso, com o objetivo de melhorar a fertilidade do solo na camada não arável, abaixo de 20 a 25 cm de profundidade (RAIJ, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

A adubação química também se baseia nos resultados da análise de solos e na expectativa de produtividade da futura lavoura. Os adubos químicos são produtos aplicados ao solo, com o objetivo de nutrir a cana. Nas áreas de agricultura de precisão, os corretivos de acidez e os fertilizantes estão sendo aplicados em quantidades variadas, ou seja, aplica-se automaticamente mais corretivo onde o solo é mais ácido e, mais fertilizante, nos locais de menor fertilidade. As doses são previamente estabelecidas com o uso de programas de computação, e a aplicação de quantidades variadas dos corretivos de acidez e dos fertilizantes é automatizada pelo computador de bordo e pelo sistema de posicionamento global (do inglês *global positioning system*, GPS) do veículo agrícola (RIPOLI *et al.*, 2007).

A aração e gradagem do solo, realizadas por ocasião da reforma ou implantação do canavial, são normalmente feitas com trator. Essa atividade tem por objetivo preparar o solo para o plantio da cana, controlar plantas daninhas, pragas, doenças, bem como misturar o calcário e o gesso ao solo. Após a aração e gradagem (com o auxílio de trator) abrem-se sulcos no solo, nos quais serão distribuídos os adubos químicos e as mudas de cana (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007).

A cana-de-açúcar é uma das culturas que mais extrai nutrientes do solo, devido à grande massa de colmos produzida e, conseqüentemente, há remoção desses nutrientes quando os colmos são cortados e transportados para a destilaria ou usina de açúcar (OLIVEIRA *et al.*, 2007; RAIJ, 2011; VERMA, 2012). Estudos são feitos para avaliar em diferentes locais e ambientes de produção qual o percentual de remoção de nutrientes deve ser repostos ao solo pelas adubações. Estas análises contemplam a produtividade física, dependente de fatores climáticos, e a máxima eficiência econômica, dependente da relação de troca entre o preço da tonelada de colmos e o preço dos fertilizantes (RAIJ, 2011; OLIVEIRA, 2012).

Definidas as doses de adubações, e estando o terreno arado e gradeado, realiza-se a sulcagem do solo para o plantio da cana, que normalmente é realizada com sulcadores-adubadores que abrem o sulco

e simultaneamente o adubam. Os sulcadores-adubadores são tracionados por tratores, que, na agricultura de precisão, são dotados de computador de bordo e de GPS para se ter o maior paralelismo entre os sulcos, visando aos tratos culturais da lavoura e à colheita mecanizada (MACHADO *et al.*, 2007; RIPOLI *et al.*, 2007). A sulcagem é realizada o mais próximo possível da distribuição das mudas e do plantio, para conservar a umidade do solo, em dias secos, ou evitar o assoreamento dos sulcos, em dias chuvosos (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007).

O espaçamento entre sulcos tem oscilado entre 0,90 e 1,40 m, variando de acordo com a distância entre os pneus dos implementos que transitarão na lavoura, da topografia, da fertilidade do solo e do tipo de cultivo. Em áreas mais férteis, devem-se adotar espaçamentos mais largos, para evitar que a cana afine e, futuramente, possa tombar com os ventos. Por outro lado, em solos de menor fertilidade e menos adubados, mais inclinados ou quando são utilizados cultivares que produzem menos colmos por área, devem-se adotar espaçamentos mais estreitos para permitir melhor distribuição espacial das plantas, cobertura mais uniforme do solo e aumento de produtividade (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007; KANEKO *al.*, 2009, RAPASSI *et al.*, 2009).

2.1.9 Mudanças de Cana

Nas áreas de produção, a cana é propagada vegetativamente, utilizando-se colmos sadios. Geralmente, esses colmos são originários de viveiros, instalados com variedades mais produtivas e mais bem adaptadas à região (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007). Definidas as variedades a serem plantadas, para aumentar o percentual de germinação desses colmos, é necessário certificar-se da qualidade das mudas, devendo ser escolhidas preferencialmente aquelas provenientes de viveiros de boa sanidade, com idade variando entre oito e 10 meses – nem muito novos, nem tampouco maduros – e, de primeiro ou, no máximo, segundo corte para assegurar maior vigor e menos contaminação por doenças e pragas. É importante também verificar se não há em um mesmo talhão mistura de outras variedades de cana. Após a distribuição dos colmos dentro do sulco faz-se sua picagem, para se obter germinação maior e mais uniforme (LANDELL *et al.*, 2006; ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007; SILVEIRA *et*

al., 2007; RIPOLI *et al.*, 2007).

É preciso ter muito cuidado ao cortar, manusear e transportar as mudas de cana, evitando pancadas ou injúrias às gemas. As folhas ajudam a proteger as gemas e, por isso, as mudas não podem ser despalhadas. O corte ocorre rente ao solo e o desponte na gema apical. Caso algum colmo tenha raízes na parte basal “pé enraizado”, é necessário o descarte dessa parte, uma vez que, nesse local, as gemas não germinam. A desinfecção do facão usado no corte das mudas contribui para a obtenção de mudas mais sadias. Recomenda-se que esse procedimento seja feito com solução bactericida/fungicida a 1,0%, antes de iniciar o corte. Os colmos que apresentarem sinais de ataques de pragas (broca, por exemplo), rachaduras ou injúrias e touceiras de outras variedades também devem ser descartados (PINAZZA *et al.*, 1986; SILVEIRA *et al.*, 2007, RIPOLI *et al.*, 2007).

Em áreas com histórico de ataque de cupins nos colmos usados como mudas, recomenda-se, preventivamente, pulverizar sobre esses colmos, após sua picagem no sulco, inseticidas de longo poder residual, visando assegurar o controle dessas pragas até a lavoura alcançar um estágio maior de desenvolvimento (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

2.1.10 Adubação Verde

No plantio da cana de ano e meio, há um intervalo de tempo entre a colheita das áreas destinadas à reforma do canavial e o novo plantio da cana-de-açúcar de 120 a 150 dias. Nesse período, é possível implantar uma cultura na área de reforma do canavial. A principal cultura utilizada pelos produtores de cana-de-açúcar é a *crotalaria juncea*, um adubo verde com grande potencial de acúmulo de biomassa e ciclagem de nutrientes.

Adubos verdes são cultivados com o propósito de incorporá-los ao solo, visando à melhoria do terreno. Essa prática é de grande importância no sistema de manejo de solos, pois mantém ou eleva sua fertilidade, tendo também efeitos sobre as propriedades físicas e biológicas do solo como o aumento na disponibilidade de nitrogênio e outros nutrientes; melhoria na estrutura do subsolo; proteção do solo da radiação solar direta; do impacto das chuvas; e a redução da infestação de plantas daninhas. Além disso, esse tipo de adubação é fonte de nutrientes tanto para a macro quanto para a microfauna e flora, tendo efeito biológico sobre diversos processos bioquímicos que resultam na

elevação da capacidade produtiva dos solos e, conseqüentemente, aumento de produtividade e longevidade do canavial (VITTI; MAZZA, 2002; DEMATTÊ, 2005; WUTKE; ARÉVALO, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2007).

As leguminosas são os adubos verdes mais usados, por fixarem o nitrogênio do ar atmosférico e, na maioria das vezes, conterem maior proporção de nutrientes em sua composição quando comparadas a outras plantas, além de produzir grande quantidade de massa verde em curtos períodos de tempo. Dentre essas leguminosas, destacam-se: soja, feijão-guandu, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, mucuna-preta, leucena, *stilosante* etc. (ORLANDO FILHO *et al.*, 1983; CÁCERES; ALCARDE, 1995; VITTI; MAZZA, 2002; DEMATTÊ, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2011).

A leguminosa *Crotalaria juncea* é considerada de alto potencial produtivo, com grande capacidade de reciclagem de nutrientes do solo e da atmosfera, porém, muito sensível à época de sementeira e à deficiência hídrica. Estudos conduzidos por Oliveira *et al.*, (2010) permitiram concluir que a sementeira da *Crotalaria* em área de reforma do canavial aumenta a produtividade, diminui os custos de produção e contribui para maior sustentabilidade das pequenas, médias e grandes propriedades produtoras de leite que utilizam cana na alimentação animal. Nestes estudos, os aumentos de produção nos ciclos de cana-planta e primeira rebrota, com o uso dessa prática, oscilaram de 26 a 32 t de biomassa; incremento que cobriu com folga os custos de produção, que variam, em preços equivalentes, de 10 a 15 t de biomassa de cana.

A adubação verde esteve em declínio por algum tempo, devido à intensificação dos cultivos e ao aumento da disponibilidade de fertilizantes químicos de baixo custo (DEMATTÊ, 2005). Em virtude de todos os benefícios citados anteriormente e da elevação do preço dos insumos usados no setor canavieiro, a adubação verde tem sido eficiente alternativa para redução de custos e melhorias das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (CÁCERES; ALCARDE, 1995; VITTI; MAZZA, 2002; OLIVEIRA *et al.*, 2011).

2.1.11 Condução do Canavial

As atividades conduzidas no canavial durante seu crescimento são o controle de plantas daninhas e de pragas e as adubações realizadas nas rebrotas. A presença de plantas daninhas causam prejuízos à

lavoura, pois podem hospedar pragas e doenças e competem com a cultura da cana-de-açúcar durante a fase de crescimento, por água, luz e nutrientes; por ocasião da colheita, quando o corte da cana é feito manualmente e sem a prévia queima, o mato diminui o rendimento do trabalhador e o torna mais vulnerável às picadas de animais peçonhentos; e, quando o controle dessas plantas não é eficiente, a vida útil do canavial diminui. Ao manter a cultura livre de mato-competição até o fechamento das entrelinhas pela cana, o sombreamento do solo assegura, na maioria das vezes, uma colheita sem plantas daninhas (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007, RAPASSI *et al.*, 2009). Existem diversos métodos de controle de ervas infestantes; portanto, ao escolhê-los, devem-se levar em consideração alguns fatores como o uso de recursos humanos e de equipamentos, sem se esquecer dos aspectos ambientais e econômicos. A esse respeito, ressalta-se, também, que a interferência das plantas daninhas em determinado cultivo deve ser reduzida até ao nível em que as perdas sejam iguais ao incremento no custo do controle, isto é, que as perdas não interfiram na produção econômica da cultura (BUARQUE, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

A adoção de práticas culturais eficientes torna a cultura da cana mais competitiva em relação às plantas daninhas. Dentre estas, podem-se destacar a redução de espaçamentos de plantio, cultivos intercalares ou rotação da cultura com leguminosas, como soja, amendoim e outras culturas (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007). Pesquisas conduzidas por Oliveira *et al.*, (2007) em áreas densamente infestadas com capim-marmelada, mostraram que a semeadura de adubos verdes, como a *Crotalaria juncea*, por ocasião da reforma do canavial, impede o crescimento de plantas daninhas, uma vez que o sombreamento causado no capim reduz o número de sementes produzidas pela gramínea, auxiliando, portanto, no controle do mato. Existem herbicidas pré-emergentes (os utilizados antes da emergência das plantas daninhas no solo) e pós-emergentes (os usados com as plantas daninhas em estágios iniciais ou muito desenvolvidas). Na escolha de determinado tipo de herbicida consideram-se, dentre outros fatores, o histórico da área, a umidade do solo, o estágio de crescimento da cana e das plantas infestantes e o preço do herbicida (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

A adubação das rebrotas é realizada logo após o corte, ou no início do período chuvoso. Essa adubação pode ser feita por meio de adubo químico e, ou, adubo orgânico (ANDRADE; ANDRADE, 2007;

OLIVEIRA *et al.*, 2007; RAPASSI *et al.*, 2009; RAIJ, 2011). Para aplicação do adubo químico são utilizadas adubadoras tracionadas por trator, enquanto a da vinhaça (adubo orgânico) é realizada por veículos-tanque e irrigação. A vinhaça é rica em matéria orgânica e em elementos minerais, principalmente potássio e cálcio, que, quando aplicada ao solo aduba a cana, diminui a acidez do terreno, aumenta a capacidade de retenção de água do solo e também é fonte de nutrientes para a macro e microfauna do solo (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2012). O excedente do bagaço também é utilizado na adubação da cana, após mistura com outros resíduos mais ricos em nutrientes (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

A produção de açúcar e de álcool pode ser prejudicada em razão da ocorrência de pragas, principalmente nas rebrotas da cana. As mais incidentes são a broca-da-cana, as formigas e as cigarrinhas. A broca-da-cana tem sido controlada, de maneira eficaz, por meio da liberação de inimigos naturais (*Coetesia flavipes*, conhecida como “vespinha”), originados da região Asiática e, no Brasil, produzidos em laboratórios especializados, alguns de universidades e outros, comerciais. O controle das formigas cortadeiras é realizado com produtos químicos, dentre estes as iscas contendo formicidas. O controle das cigarrinhas pode ser por meio químico ou biológico, neste caso usando o *fungus Metarhizium* (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007; RAPASSI *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

2.1.12 Colheita dos Colmos e o Pagamento da Cana

Para que a cana seja colhida, é necessário que ela esteja madura. Com a maturação, há aumento da concentração de açúcares no caldo, especialmente da sacarose. Essa maturação é influenciada pela temperatura, teor de água disponível no solo, fertilidade do solo, estado nutricional, idade das plantas e variedades. No centro-sul, baixas temperaturas associadas ao déficit hídrico são os principais fatores climáticos responsáveis por essa maturação. A fertilidade do solo também influencia na maturação da cana, pois, em condições de maior disponibilidade de nitrogênio e potássio, a cana-de-açúcar atrasa a maturação (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007). De um ano para outro, ocorre variação na distribuição e volume de chuvas, radiação solar e temperatura, fatores que podem causar alterações na maturação da cana; por isso, um procedimento padrão

adotado em diversas regiões canavieiras do Brasil é avaliar a maturação de cada talhão de cana antes da colheita (PINAZZA *et al.*, 1986; MACHADO *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007; ALMEIDA *et al.*, 2008; SILVA, 2011).

Há vários métodos para avaliar a maturação da cana, sendo alguns bem subjetivos e, assim, exige-se maior experiência do avaliador. Um deles é o aspecto dos canaviais, que, quando maduros, apresentam-se com muitas folhas secas e amarelecidas e, por outro lado, poucas folhas verdes (OLIVEIRA *et al.*, 2007). Essa avaliação é muito empírica e, às vezes, usada por pequenos produtores. Em áreas extensas, essa avaliação é feita com base em análise de laboratório. Comparam-se os teores de açúcar obtidos nas análises com os do histórico da variedade de cana da região, optando-se pela colheita dos talhões mais maduros (MACHADO *et al.*, 2007; SILVA, 2011).

Por ocasião da colheita, faz-se um planejamento do corte visando sincronizar, ao máximo, o corte, o transporte e a industrialização da cana. Quando a cana é colhida manualmente e os colmos permanecem no campo por mais de 72 horas após o corte, ocorre deterioração por ação de bactérias e fungos, que além de causarem perdas de açúcares, produzem substâncias que comprometem a industrialização e diminuem a qualidade do açúcar produzido (OLIVEIRA *et al.*, 2007). Na produção de álcool, essas substâncias produzidas por bactérias e fungos também interferem negativamente no metabolismo das leveduras produtoras de álcool, diminuindo a eficiência da fermentação (SOLOMON, 2009; VERMA *et al.*, 2012).

No Brasil, até o ano de 1997, as usinas pagavam aos fornecedores de cana pelo teor de sacarose aparente do caldo da cana, conhecido como pagamento de cana pelo teor de sacarose (PCTS). Entretanto, a partir de 1998, iniciou-se a implantação do sistema de pagamento da cana pelo total de açúcares recuperáveis (ATR). Esse sistema é um aprimoramento do primeiro, pois inclui além da sacarose, dos açúcares redutores, da eficiência de extração e industrialização, o percentual da produção destinada à fabricação de álcool e açúcar, assim como o preço de comercialização, sendo, portanto, um sistema que adota diversas variáveis para o pagamento da cana no qual o fornecedor torna-se parceiro da usina (FERNANDES, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2011; SILVA, 2011). Quem estabelece as normas para o pagamento da cana pelo ATR é um conselho situado em cada estado produtor, formado pelos produtores, pela indústria sucroenergética e por técnicos indicados pelos produtores e usineiros, designado abreviadamente CONSECANA

(CONSECANA, 2006). A qualidade do caldo obtida através das unidades industriais altera-se de acordo com a variedade da cana, época de colheita, condições edafoclimáticas, tratos culturais e com a adubação (SIMIONI *et al.*, 2006; SILVA, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

A produtividade média dos canaviais (incluindo os colmos industrializáveis, as folhas secas e os ponteiros) tem oscilado em torno de 90 t de matéria natural por hectare, sendo aproximadamente 80% dessa massa constituída pelos colmos industrializáveis. Adotando-se manejo correto na calagem, adubação e tratos culturais adequados, bem como na escolha da variedade, podem-se alcançar produtividades superiores a 150 t de matéria natural por hectare e, ainda, sob irrigação complementar, essa produtividade média pode ultrapassar 200 t de matéria natural por hectare (FERNANDES, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2003; DEMATTÊ, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Nas grandes propriedades rurais, a cana-de-açúcar é utilizada principalmente para a produção de açúcar e álcool, mas nas pequenas e médias, além da fabricação de rapadura, açúcar mascavo e cachaça, faz-se uso desta cultura para a alimentação de bovinos, aves e suínos (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2010).

O ponto fundamental do sucesso de uma organização é a sustentabilidade interna do sistema (GOES; MARRA, 2008). Assim, “o termo sustentabilidade deve ser compreendido como um conceito sistêmico, relacionado com a continuidade dos aspectos econômicos, sociais, culturais e ambientais da sociedade humana” (AMATO NETO, 2011, p. 2). Para tanto, há geração de novas tecnologias, que são rapidamente assimiladas pelo setor produtivo, por exemplo o melhoramento genético, com o aumento da diversificação de variedades – mais de 500 variedades de cana são atualmente cultivadas no Brasil – sendo 51 liberadas nos últimos 10 anos. O aumento da diversificação de variedades, nestes últimos anos, segundo Macedo (2007a), não somente permitiu avanço significativo nos níveis de produtividade (evolução da produção em termos de área), como também conferiu grande segurança em relação à resistência contra pragas e doenças. Existem outros fatores, como a adoção do plantio direto e o uso de controle biológico que direcionam impactos ambientais positivos.

Atualmente, há no Brasil quatro programas de melhoramento de cana-de-açúcar: Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA), Cooperativa dos Produtores de

Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo-Centro de Tecnologia Canavieira (COOPERSUCAR-CTC), Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e CanaVialis. O equilíbrio entre a sustentabilidade e a produtividade da cana deve-se à inserção de várias tecnologias relacionadas à conservação do solo, nutrição, adubação e manejo varietal (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

Com base em Fernandes (2000); Vitti e Mazza (2002); Macedo *et al.*, (2004); Demattê (2005); Oliveira (2007); Burnquist (2011) e Oliveira *et al.*, (2011), no Quadro 1, são mostrados os principais insumos, atividades e as respectivas unidades, para implantação e condução de um hectare de cana-de-açúcar.

Quadro 1 - Principais itens para implantação, condução e colheita de um canavial.

Item	Unidade
A) Insumo	
Área disponível (terra)	ha
Calcário	t
Gesso	t
Muda de cana	t
Inseticida	L ou kg
Herbicida	L ou kg
Adubo	kg
B) Atividade	
Análise de solo	amostra
Aração	h/m
Gradagem	h/m
Sulcagem	h/m
Aplicação do adubo no sulco de plantio	*h/m ou **d/H
Distribuição e picagem das mudas	d/H
Aplicação de inseticida sobre as mudas	***h/H ou d/H
Cobertura das mudas	h/m ou d/H
Aplicação de herbicidas	h/m ou d/H
Corte da cana	d/H; h/m
Transporte da cana	h/m

*h/m - horas máquina; **d/H - dias homem; ***h/H - horas homem.

Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre as várias tecnologias utilizadas, as escolhidas devem contemplar a otimização do uso dos insumos, da terra e dos recursos humanos, o que, conseqüentemente, elevará a produtividade e reduzirá os custos de produção, em consonância com a preservação ambiental (VITTI; MAZZA, 2002; DEMATTÊ, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2007).

Assim, sugerem-se ampliar os estudos de práticas agrícolas que aumentem a capacidade de infiltração e retenção de água pelo solo. O uso de matéria orgânica, originária de resíduos da industrialização da própria cana, nas áreas de rebrotas da cana e o cultivo de plantas de grande capacidade de acúmulo de biomassa (adubos verdes), nas áreas de reforma de canavial, poderão contribuir para aumentar a infiltração e retenção de água no solo.

A forma de utilização dos recursos necessários para a produção e a eliminação das folgas ou perdas está relacionada à tecnologia adotada no processo de produção (FERREIRA; GOMES, 2009). Assim, com o propósito de aumentar o desempenho das unidades produtivas, as universidades, centros de pesquisas, usinas e destilarias vem desenvolvendo estudos e pesquisas para obterem e validarem novas tecnologias, uma vez que o processo é dinâmico e requer constante atualização para ser competitivo, rentável e ecologicamente correto.

2.1.13 Avaliação de Desempenho do Setor Sucroenergético

Toda organização precisa, de alguma forma, medir seu desempenho, como pré-requisito para a melhoria contínua. A falta de conhecimento dos problemas que uma empresa enfrenta no ambiente em que atua explica por que muitas delas, mesmo sendo inicialmente promissoras, não conseguem se manter no mercado (SLACK *et al.*, 2009; BUENO *et al.*, 2011). No entanto, é fundamental que se conheçam as causas que os originam, as possíveis alternativas de solução e o impacto que cada uma delas gera nos ambientes internos e externos da organização (BUENO *et al.*, 2011).

Para que uma empresa esteja em vantagem perante a competição eficiente, é necessária constante procura pelo aperfeiçoamento de suas atividades, ao concentrar esforços na busca da melhoria em seu processo produtivo, não apenas com inovações tecnológicas, mas com a eliminação de desperdícios no processo. Nesse processo de melhoria contínua, a eliminação de desperdícios é peça fundamental para que a organização se sobreviva no mercado moderno; entendendo-se por desperdício todo insumo consumido de forma não eficiente e eficaz, até mesmo atividades desnecessárias que não agregam valor à empresa moderna (BORNIA, 2009).

Existem diversos métodos de avaliar o desempenho de uma organização. Um conjunto de métodos é formado por modelos

paramétricos (estatísticos) e o outro conjunto por modelos não paramétricos ou não estocásticos. Os métodos estatísticos paramétricos supõem uma relação funcional entre a produção e os insumos e utilizam como suporte medidas de tendência central, por exemplo, a média aritmética (MACEDO; BENJIO, 2003; RIBEIRO, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009). Porém, os métodos mais comuns de avaliar o desempenho relativo de organizações públicas, comerciais ou beneméritas são os não estocásticos. Dentre estes métodos, a Análise Envoltória de Dados (DEA) e o Índice de Produtividade Total dos Fatores de Produção (Índice de *Malmquist*) vêm se destacando como importantes ferramentas para avaliarem a eficiência relativa de unidades tomadoras de decisão (COELLI; RAO, 2003; RAY, 2004; COOK; ZHU, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009).

2.2 ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA) E ÍNDICE DE *MALMQUIST*

A Análise Envoltória de Dados, conhecida internacionalmente como *Data Envelopment Analysis (DEA)*, tem sido bastante difundida, no Brasil e no exterior, em diferentes setores (FERREIRA; GOMES, 2009). A abordagem DEA constitui uma alternativa e um complemento aos métodos de análise tradicionais, em situações em que os preços de mercado não são conhecidos ou os valores relativos são de difícil mensuração. Pois, a DEA é usada para avaliar, por meio de um modelo de programação matemática, a eficiência relativa de um conjunto de organizações, que utilizam processos tecnológicos semelhantes para transformar insumos em produtos, denominadas *Decision Making Units (DMUs)* – unidades tomadoras de decisão – produtivas (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978; CHARNES *et al.*, 1997; COOPER *et al.*, 2004; BROTTI; LAPA, 2007; COOK; ZHU, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009).

Cada DMU pode ser uma organização com ou sem fins lucrativos, por exemplo um município, país, unidade administrativa ou operacional, empresa, divisão, departamento, indivíduo ou um item cuja eficiência está sendo avaliada (GOMES; BAPTISTA, 2004; VILELA *et al.*, 2007; COOK; ZHU, 2008; SOUZA; MACEDO, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009; SOUSA *et al.*, 2009; REIS *et al.*, 2011).

2.2.1 Conceituações Básicas e Origem da Análise Envoltória de Dados

A Análise Envoltória de Dados é definida como um método ou técnica da pesquisa operacional que tem como principal objetivo avaliar o desempenho relativo de organizações ou unidades homogêneas, que realizam tarefas similares e se diferenciam nas quantidades de *inputs* que consomem e de *outputs* que produzem, porém independentes no que se refere ao seu desempenho operacional (COELLI, 1996; LINS; ÂNGULO-MEZA, 2000; MACEDO; BENJIO, 2003; COOPER *et al.*, 2004; LUO, 2004; FERREIRA; GOMES, 2009). A DEA tem por finalidade construir uma fronteira de produção ou de possibilidades de produção, usada para caracterizar uma transformação eficiente de insumos em produtos (CHARNES, COOPER, RHODES, 1978; RAY, 2004; GOMES e BAPTISTA, 2004; MELLO *et al.*, 2005; FERREIRA; GOMES, 2009); uma vez que produção é um processo no qual os *inputs* (insumos ou recursos) são utilizados para gerar *outputs* (produtos), e a fronteira de produção é definida como a produção máxima que pode ser obtida com dada tecnologia (LINS e CALÔBA, 2006; FERREIRA; GOMES, 2009).

Além de indicar as DMUs eficientes, a DEA aponta para as DMUs ineficientes, metas (*targets*) ótimas de produção e de consumo, a partir dos dados observados nas DMUs eficientes. Para cada unidade ineficiente, os modelos DEA fornecem suas respectivas DMUs de referência, determinados pela projeção dessas unidades na fronteira de eficiência. As unidades que servem de referenciais para estabelecimento de metas, ou comparação direta, são denominadas *benchmarks* ou *peers* (melhores práticas). Ademais, essa abordagem pode inferir a natureza dos retornos de escala em cada uma das DMUs e identificar, para cada DMU ineficiente, quais seriam as referências virtuosas, cujas combinações convexas servem de caminho indicativo para a fronteira de eficiência (MARINHO *et al.*, 2012; SAURIN; LOPES; COSTA JÚNIOR, 2010).

2.2.2 Princípios Fundamentais da Análise Envoltória de Dados

Com o aumento da concorrência após a abertura dos mercados e globalização da economia, tem sido crescente a preocupação com a eficiência e produtividade nas diferentes cadeias produtivas, entre

empresários e técnicos de diferentes segmentos econômicos, bem como entre profissionais da área acadêmica, uma vez que essas exigem reavaliação de metas e métodos para assegurarem viabilidade e competitividade (TUPY; YAMAGUCHI, 1998).

A análise Envoltória de Dados tem como princípio a produtividade e a eficiência, pois com esta abordagem objetiva-se avaliar o desempenho de atividades e organizações, essencialmente por meio da avaliação da eficiência técnica (BANKER *et al.*, 1984; RAY, 2004; COELLI, 1996; COOK; ZHU, 2008). Desse modo, quanto maior a produção de uma unidade para dada quantidade de insumos ou, alternativamente, menor a quantidade de insumos utilizada para certa quantidade de produto, maior será a eficiência desta unidade (CAETANO; MIRANDA, 2007).

Os conceitos de produtividade, eficiência e eficácia, em estudos de avaliação de desempenho são diferentes. Lapa e Neiva (1996); Tupy e Yamaguchi (1998); Ferreira e Gomes (2009) salientam as diferenças e contribuem para a apropriação devida desses termos dentro do enfoque da economia da produção.

2.2.2.1 Eficácia

O termo eficácia “é o critério administrativo que mede a capacidade real de alcançar resultados almejados” (LAPA; NEIVA, 1996). Este termo está relacionado ao atendimento do objetivo que se visa atingir, sem levar em conta quais recursos foram empregados e como foram usados (FERREIRA; GOMES, 2009).

2.2.2.2 Produtividade

O conceito de produtividade está associado à razão entre o que uma organização gera como produtos e resultados e o que ela consome como insumos e recursos para gerar esses produtos e resultados (LAPA; NEIVA, 1996; TUPY; YAMAGUCHI, 1998; STÜKER, 2003); isto é, “aos *quanta* de recursos e insumos de que ela dispõe e usa para realizar suas atividades e aos *quanta* do que ela gera em termos de produtos e resultados” (LAPA; NEIVA, 1996).

A produtividade enfatiza a capacidade da organização de gerar dado volume de produtos e resultados para dado volume de recursos e

insumos empregados no processo, sem se interessar pela tecnologia de processo utilizada, nem como esta é utilizada (LAPA; NEIVA, 1996). Ferreira e Gomes (2009) destacam que esse conceito sugere que os insumos estejam sendo usados da melhor forma possível.

Em um sistema em que se utiliza um único insumo na produção de um único produto, o método mais tradicional de se medir o desempenho de uma organização é por meio do cálculo da produtividade parcial. Nesse sistema, a produtividade de uma unidade de produção é entendida como a razão entre os resultados obtidos por uma unidade de produção e os recursos gastos para gerar esses resultados (TUPY; YAMAGUCHI, 1998; STÜKER, 2003; CESCUNETTO *et al.*, 2008, FERREIRA; GOMES, 2009). Todavia, é comum nas unidades produtivas serem empregados diferentes insumos na produção de um ou mais produtos e, nestes casos, conhecer apenas a produtividade parcial de uma organização não permite saber se esta está operando de maneira eficiente ou ineficiente, uma vez que a produtividade parcial não considera todos os fatores de produção, e isso pode levar a uma interpretação errônea, por atribuir a um insumo o acréscimo produtivo que pode ter sido gerado por outro insumo não incluído na análise (CESCUNETTO *et al.*, 2008). Para sanar este problema, calcula-se a produtividade total que é representada pela razão entre a soma ponderada dos produtos gerados pela soma ponderada dos recursos consumidos naquela produção (CESCUNETTO *et al.*, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009). Dessa maneira, os produtos e os insumos, respectivamente, devem ser agregados no numerador e no denominador, de forma economicamente sensível, para que a produtividade se apresente como a relação de dois escalares (TUPY; YAMAGUCHI, 1998).

Por conseguinte, a produtividade total (PT) de múltiplas entradas e saídas pode ser assim descrita:

$$PT = \frac{P_1 \cdot u_1 + P_2 \cdot u_2 + \dots + P_n \cdot u_n}{I_1 \cdot v_1 + I_2 \cdot v_2 + \dots + I_n \cdot v_n}$$

em que P e I são os produtos e os insumos e, u e v são, respectivamente, os pesos atribuídos a esses produtos e insumos.

Aumentar a produtividade permite produzir com menor quantidade de recursos a mesma quantidade anterior ou, alternativamente, atingir maior produção sem incrementar os recursos na

mesma proporção. Por conseguinte, índices de produtividade constituem indicadores do aproveitamento de recursos, os quais são inversamente proporcionais aos custos da produção (MACHADO, 2002; STÜKER, 2003; FERREIRA; GOMES, 2009). Então, essa produtividade permanecerá como a relação de dois escalares e sofre variações em razão de diferenças na tecnologia de produção, na eficiência dos processos de produção e no ambiente em que ocorre a produção (TUPY; YAMAGUCHI, 1998).

2.2.2.3 Eficiência

O termo eficiência é definido como a forma de aproveitar, utilizar ou realizar de maneira mais produtiva os recursos empregados para obtenção de resultados pretendidos (FERREIRA, 2005); como a razão entre a quantidade de insumos observados e o potencial mínimo exigido para produzir uma quantidade fixa de produtos (WILHELM; BARBOSA, 2009); como uma medida de rendimento global de um sistema (FERREIRA, 2005); como a maneira certa de fazer as coisas (BIO, 1996); e como a melhor forma de atingir os objetivos (FERREIRA *et al.*, 2002).

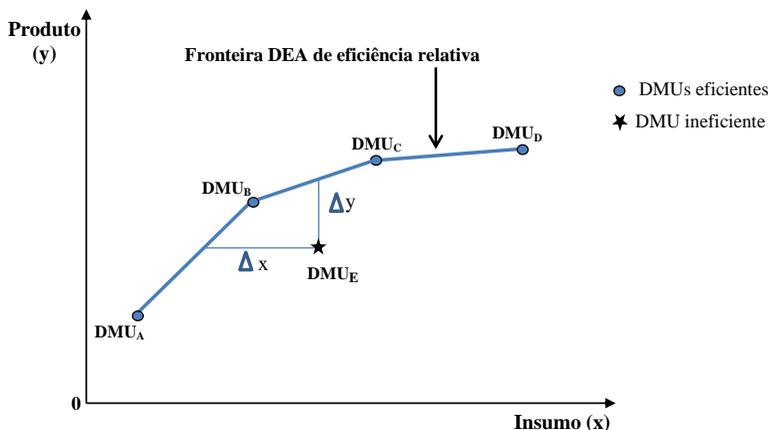
Uma organização é eficiente quando tem capacidade de melhorar as condições internas de operacionalização do sistema, enfatizando a rapidez na execução dos processos produtivos, ou seja, ao se revelar na capacidade real de produzir o máximo com o mínimo de recursos, energia e tempo (LAPA; NEIVA, 1996; MELLO *et al.*, 2003; FERREIRA, 2005; OLIVEIRA, 2009a). Farrell (1957) definiu uma organização eficiente como aquela que consegue produzir maior quantidade de *output* dado certo mix de *inputs*. A eficiência organizacional é associada, conforme Wolff (2005), à racionalidade econômica, cuja preocupação é buscar os meios e procedimentos mais adequados para alocar os recursos com vistas a uma produção ótima. Essa racionalização pode ser entendida como um dos princípios da cadeia de valor enfatizados por Womack e Jones (2004), no qual se foca a capacidade de combater desperdícios de tempo e de insumos, ou seja, alocar recursos para os processos e atividades de forma a produzir cada vez mais com cada vez menos insumos.

A ineficiência de uma organização pode ser associada ao fracasso em alcançar a produção ótima, ou a fronteira de eficiência (FERREIRA; GOMES, 2009). Assim, a ineficiência seria a distância que uma unidade

produtiva encontra-se abaixo da fronteira de produção (FERREIRA; BRAGA, 2007).

Na abordagem DEA, a fronteira de eficiência é construída com dados observados das próprias unidades tomadoras de decisão. Para esta construção, define-se como DMUs eficientes aquelas que, em comparação com as demais, não podem ter seus insumos reduzidos nem seus produtos aumentados. Uma vez fixados os *inputs*, a DEA identifica a DMU que apresenta mais *outputs* e, fixados os *outputs*, identifica a DMU que utiliza a menor quantidade de *inputs*. As unidades são consideradas tecnicamente eficientes em relação às demais quando atendem a essas duas premissas. A união dos pontos (Figura 8) dessas DMUs consideradas eficientes forma a linha de eficiência (fronteira), que é denominada Retornos Variáveis de Escala (VRS – *variable returns of scale*) (BORGES, 2006). Nessa figura mostra-se como se constrói a fronteira eficiente a partir das unidades eficientes, modelo VRS DEA.

Figura 8 - Construção de uma fronteira eficiente, modelo DEA com RVE.



Fonte: Adaptada de Banker *et al.*, 1984; Färe, 1994; Borges, 2006.

Note-se que as DMUs “A”, “B”, “C” e “D” compõem a fronteira (VRS) e são exemplos de unidades eficientes, porém consomem insumos em quantidades diferentes e oferecem produtos em quantidades também diferentes. A DMU_E (Figura 8) não está na fronteira e é, portanto, exemplo de uma unidade considerada tecnicamente ineficiente em relação às demais (BANKER *et al.*, 1984; FÄRE *et al.*, 1984; FÄRE

et al., 1994; RAY, 2004; BORGES, 2006; COOK; ZHU, 2008). Assim, para que a DMU_E se torne relativamente eficiente é necessário aumentar a produção (Δy) mantendo o mesmo número de insumos ou manter o mesmo nível de produção e reduzir os insumos (Δx).

A importância fundamental de DEA é a sua possibilidade de construir uma fronteira com segmentos lineares, uma “fronteira de melhor prática”, utilizando-se as organizações reais nos seus pontos extremos, e organizações “virtuais” ou “compostas”, criadas a partir de combinações convexas das organizações reais. Essa fronteira convexa – que não pode ser cortada por uma reta em mais de dois pontos – é formada pelas DMUs com maiores razões produto/insumo, e envolve os dados de tal forma que as demais DMUs ficam aquém dela (BANKER *et al.*, 1984; FÄRE, 1994; RAY, 2004; SOUSA *et al.*, 2009; BARROS *et al.*, 2010). Assim, a fronteira corresponde à envoltória formada por facetas lineares que ligam os planos de operação executados pelas organizações eficientes, de modo que os planos ineficientes fiquem sob essa envoltória (BANKER *et al.*, 1984; FÄRE, 1994; RAY, 2004; FERREIRA; GOMES, 2009; SALGADO JUNIOR *et al.*, 2009; SOUSA *et al.*, 2009; WILHELM; BARBOSA, 2009; MACEDO *et al.*, 2010; BARROS *et al.*, 2010).

2.2.3 Avaliação da Eficiência pela Abordagem DEA

Existem diversas formas de avaliar a eficiência ou de avaliar quantitativamente se uma organização atinge o melhor resultado possível, dados os recursos disponíveis, ou seja, avaliar o grau de eficiência com que o empreendimento transforma insumos em produtos (MOREIRA, 2005; PALADINI, 2009). Para tanto, a abordagem DEA incorpora diversos *inputs* (entradas, recursos, insumos ou fatores de produção) e *outputs* (saídas ou produtos) para verificar a eficiência de unidades tomadoras de decisão (GOMES *et al.*, 2005) e expressa o desempenho por meio da comparação entre os valores dos produtos e recursos consumidos em cada unidade, com os valores das melhores unidades avaliadas (MACEDO *et al.*, 2010).

Em DEA, será considerada ineficiente qualquer DMU que produza menores quantidades de produtos que qualquer outra que tenha o mesmo consumo de recursos. Analogamente, qualquer DMU que gere os mesmos níveis de produtos e que consuma mais recursos do que qualquer outra também será considerada ineficiente. Pode-se entender

que as unidades eficientes são aquelas não dominadas por nenhuma outra e que, por isso, determinam uma fronteira de eficiência (MARINHO *et al.*, 2012). Para verificar a eficiência de cada DMU são atribuídos pesos relativos aos insumos e produtos. Assim, a eficiência relativa de uma DMU é igual à razão entre a soma ponderada dos *outputs* e a soma ponderada dos *inputs*, em que os pesos de ambos são selecionados de forma a tornar uma DMU mais produtiva, atendendo à condição de que o conjunto de pesos obtidos para cada DMU deve ser também possível para todas as outras, de maneira que as DMUs apresentem indicadores situados entre 0 e 1 ou de 0% a 100% (MACEDO; BENJIO, 2003; FERREIRA; GOMES, 2009).

Apenas as DMUs que obtêm índice de eficiência igual a um são efetivamente eficientes (FÄRE *et al.*, 1994; RAY, 2004; BOZOĞLU *et al.*, 2007; FERREIRA; GOMES, 2009). Todavia existem modelos que não impõem limites superiores para os escores. Quanto maior o escore, maior a produtividade estimada para a DMU. A DEA também permite destacar, em cada unidade, quais são os níveis de consumo e de produção que tornariam as unidades eficientes (MARINHO *et al.*, 2012). Dessa forma, a DEA atribui a cada DMU um valor (escore) representativo de seu desempenho relativo.

Os primeiros estudos de medidas de eficiência produtiva foram publicados em 1951, por Gerard Debreu. Nestes estudos, Debreu introduziu uma medida radial de eficiência técnica que permitisse a máxima redução equiproporcional de todos os insumos, ou a máxima expansão equiproporcional de todos os produtos, independentemente das unidades de medidas desses insumos e produtos. A desvantagem desta medida é que a eficiência técnica não necessariamente corresponde à eficiência econômica. Assim, em 1957, Michael James Farrell ampliou o trabalho de Debreu introduzindo o conceito de eficiência econômica ou alocativa na microeconomia (COELLI, 1996; FERREIRA; GOMES, 2009) e propôs que a eficiência de uma firma produtiva tivesse dois componentes: eficiência técnica e eficiência alocativa ou econômica (FARREL, 1957).

Michael James Farrel, em 1957, ao utilizar a programação linear para encontrar a eficiência técnica de organizações, construiu o método *Data Envelopment Analysis*, com base no trabalho de Gerard Debreu, intitulado *The coefficient of resource utilization*, publicado em 1951 no *Econometrica-Journal of the Econometric Society*, e nos trabalhos iniciados por Koopmans. Entretanto, esta abordagem restringia à análise de apenas um insumo (*input*) e um produto (*output*). Em 1978,

baseando-se nos trabalhos desses autores, Abraham Charnes, William W. Cooper e Edwarde Lao Rhodes inovaram ao construir um modelo para incorporar múltiplos insumos (*inputs*) e múltiplos produtos (*outputs*) da produção (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978; FÄRE *et al.*, 1984; BANKER *et al.*, 1984; COELLI, 1996; BANKER; NATARAJAN, 2008).

Nesse modelo, Charnes, Cooper e Rhodes consideravam a hipótese de rendimentos constantes de escala, por entenderem que o crescimento proporcional dos *inputs* produziria crescimento proporcional dos *outputs*. Em 1984, Rajiv D. Banker, William Cooper e Edwardo Rhodes propuseram um modelo complementar em que foram consideradas situações de eficiência de produção com variação de escala, sem a relação de proporcionalidade entre os *inputs* e *outputs* (BANKER *et al.*, 1984; RAY, 2004; COOK; ZHU, 2008).

Quando se comparam duas ou mais organizações ou atividades produtivas, um processo de produção é considerado tecnicamente eficiente se utilizar a menor quantidade de insumos para o mesmo nível de produção que os demais processos (LOVELL, 1993; TUPY; YAMAGUCHI, 1998; FERREIRA; GOMES, 2009). Assim, eficiência técnica é um conceito relativo, em que se comparam os níveis de insumos e produtos observados com os níveis de insumos e produtos ótimos, ou o que foi produzido por unidade de insumo utilizado (produção realizada) com o que poderia ser produzido (potencial máximo atingível) (FERREIRA; GOMES, 2009).

Quando o ótimo é definido em termos de possibilidades de produção, este se refere à eficiência técnica, e, quando o ótimo é definido ao comparar custo, lucro ou receita em observação com custo, lucro ou receita considerada em nível ótimo, tem-se como resultado a estimativa de eficiência econômica (COELLI, 1996; TUPY; YAMAGUCHI, 1998). Dessa forma, a eficiência econômica ou alocativa refere-se à habilidade de combinar insumos e produtos em proporções ótimas, dados os seus respectivos preços e a produção tecnológica (LOVELL, 2003; TUPY; YAMAGUCHI, 1998; COELLI, 1996; FERREIRA; GOMES, 2009; WILHELM; BARBOSA, 2009); em uma proporção que minimize os custos de produção (WILHELM; BARBOSA, 2009) e pretendendo, assim, alcançar o produto máximo, dado determinado volume de recursos; ou, ao estabelecer uma meta para o produto, como consegui-la com um gasto mínimo (DELGADO; MACHADO, 2007; FERREIRA; GOMES, 2009).

Anjos (2005) sintetiza que a eficiência alocativa é determinada

com base em variáveis econômicas, enquanto a eficiência técnica é avaliada pelas possibilidades de produção. Segundo Coelli (1996); Ferreira e Gomes (2009), a combinação desses dois resultados resulta na eficiência econômica total.

Na Análise Envoltória de Dados, a produção aquém da adequada ou o excesso do uso de insumos denomina-se folga (*slack*). Sempre que existe folga de insumos (*input slack*) ou de produtos (*output slack*), a produção está sendo ineficiente. Assim, ao fazer um paralelo com a engenharia, a folga de insumo é a energia desperdiçada, isto é, parte da energia que é perdida por estar aquém do potencial de produção (FERREIRA; GOMES, 2009; LORENZETT *et al.*, 2010).

2.2.3.1 Avaliação da eficiência com orientação insumo e orientação produto

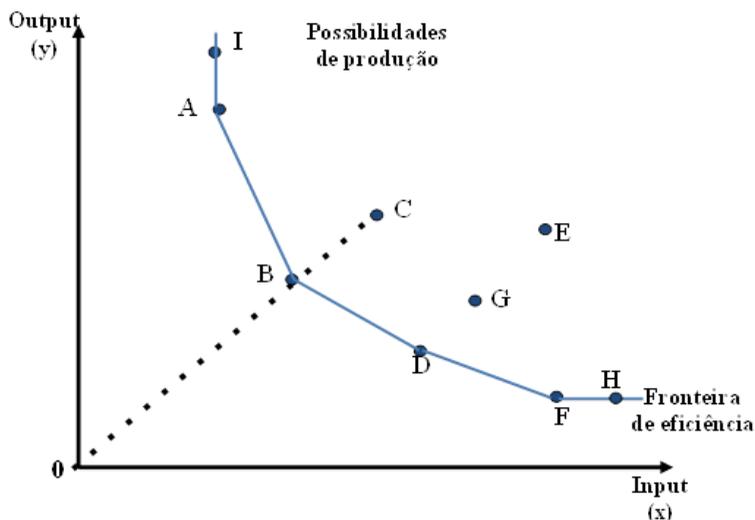
Os modelos DEA indicam as DMUs *benchmarks* para as unidades ineficientes, determinados pela projeção destas unidades na fronteira de eficiência; portanto, a forma como é feita esta projeção é que determina a orientação do modelo, que pode ser com orientação a insumos (*inputs*) ou orientação a produtos (*outputs*). Esta orientação proporciona o mesmo resultado sob retornos constantes de escala, mas resultados diferentes sob retornos variáveis à escala (CHARNES *et al.*, 1978; BANKER *et al.*, 1984; RAY, 2004; COOK; ZHU, 2008). Conforme Saurin, Lopes e Costa Júnior (2010, p. 176), “se uma unidade for eficiente no modelo orientado a produto também o será no orientado a insumo. Entretanto, dependendo da orientação utilizada, as unidades de referência e os indicadores de retração de insumos ou expansão de produtos, para as unidades ineficientes, poderão ser diferentes”.

Nos modelos DEA com orientação insumo (Figura 9), a distância é calculada por meio da maximização do uso de insumos – eliminando folga ou excesso (*slack*) – para a mesma quantidade de produtos. Nos modelos DEA com orientação produto (Figura 10) a distância é calculada por meio da maximização dos produtos sem diminuir os insumos – mostra-se o quanto a unidade poderia aumentar a produção (folga) usando-se aquela quantidade de insumos (ÂNGULO-MEZA *et al.*, 2002; COOPER *et al.*, 2004; GOMES *et al.*, 2004; LINS *et al.*, 2004; RAY, 2004; SURCO; WILHELM, 2006; COOK; ZHU, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009).

As medidas obtidas são comparativas, uma vez que se baseiam na

identificação de melhores práticas dentre os casos observados e analisados, e, para cada caso, podem ser decompostas em medidas de ajuste e de desajuste em relação a valores de fronteira (*target*) para cada *input* e para cada *output*, ou seja, níveis dos *inputs* e *outputs* que devem ser atingidos para se tornarem eficientes (MARINHO; FAÇANHA, 2001). A Figura 9 ilustra a projeção DEA orientada a insumos.

Figura 9 - Projeção das DMUs orientada a insumos.



Fonte: Adaptada de Banker, 1985; Ray, 2004; Lopes, 2012.

Observa-se, pela Figura 9, que as DMUs que se encontram sobre a fronteira de produção (A, B, D e F) são consideradas eficientes. As que se situam acima da fronteira de produção (C, E, G, H e I) são taxadas de ineficientes. Por exemplo, a ineficiência da DMU C é medida por OB/OC , que indica a quantidade (expressa em termos percentuais) que os insumos 1 e 2 devem ser reduzidos sem qualquer redução na produção.

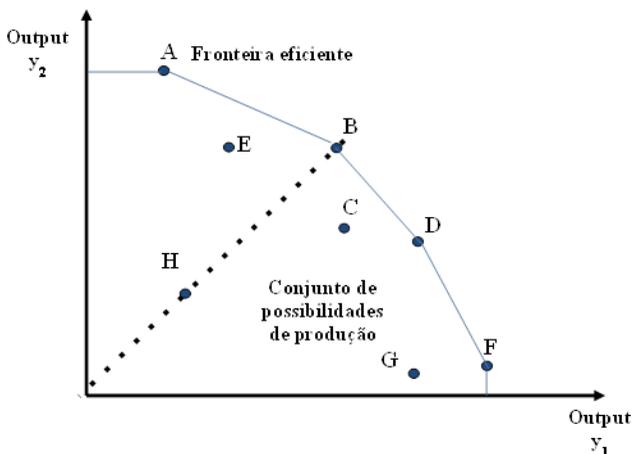
As DMUs que se localizam sobre a fronteira, porém, nos ramos paralelos aos eixos coordenados são conhecidas como “falsos eficientes”, uma vez que para produzir aquela quantidade de produtos bastava um volume menor de insumo ou, ao se manter a quantidade de insumos, a quantidade de produtos deveria ser aumentada. Portanto, estas são consideradas ineficientes, uma vez que poderiam produzir a

mesma quantidade de produtos consumindo menos insumos (BANKER *et al.*, 1984; RAY, 2004; LOPES, 2012).

A expressão da eficiência técnica orientada a insumo de dada DMU pode ser assim descrita: $\theta.X_i=X_{i0}$; em que θ é o índice de eficiência da DMU em observação; X_i representa todos os insumos consumidos, que podem variar de $1 \dots n$; e X_{i0} mostra a quantidade ideal do insumo que a DMU em observação deveria consumir para se tornar eficiente. Quanto menor o θ , mais distante da fronteira estará a DMU em observação. A expressão $1/\theta$ indica a distância da DMU da fronteira e é chamada de Distância de Shephard. No caso de mais de um insumo, as reduções são equiproporcionais e aplica-se a chamada redução radial de Debreu (BANKER *et al.*, 1984; RAY, 2004; FERREIRA; GOMES, 2009; LOPES, 2012).

Quando se deseja aumentar a produção sem diminuir os insumos, a projeção é voltada para orientação a produto (BANKER *et al.*, 1984; RAY, 2004; COOK e ZHU, 2008). A Figura 10 ilustra a projeção DEA orientada a produtos.

Figura 10 - Projeção orientada a produtos.



Fonte: Adaptada de Banker *et al.*, (1984); Ray (2004); Lopes (2012).

A Análise Envolvória de Dados indica para as DMUs não eficientes quais ajustes devem ser feitos em cada *input* ou *output*, para que estas se tornem eficientes, sugerindo valores ideais de *inputs* ou de *outputs* (*targets* ou alvos), de acordo com as condições da unidade (BORGES, 2006).

2.2.4 Modelos Básicos de Análise Envoltória de Dados

Os modelos DEA são desenvolvidos com base em uma amostra de dados observados em diferentes unidades produtoras. As DMUs reais e virtuais realizam tarefas similares, porém são independentes no que se refere ao seu desempenho operacional e se diferenciam nas quantidades de *inputs* que consomem e de *outputs* que produzem, levando-se em consideração os recursos utilizados, consumidos ou transformados durante o processo produtivo (BANKER *et al.*, 1984; LINS *et al.*, 2004; BORGES, 2006; COOK; ZHU, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009).

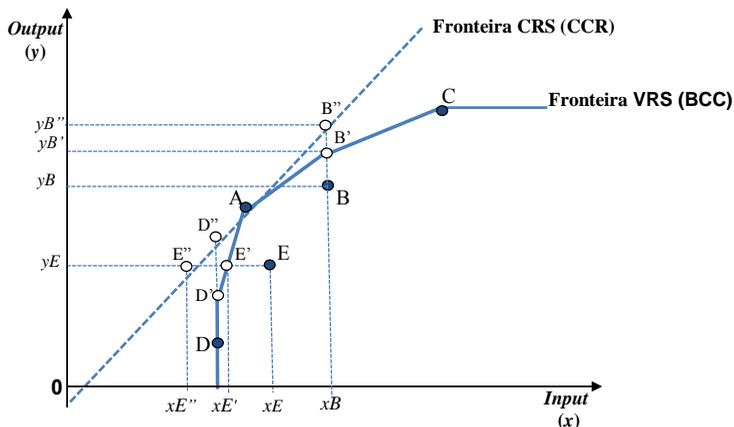
Para cada DMU analisada, denominada DMU objetivo (DMU_o – sendo $o = 1, 2, \dots, n$) são atribuídos pesos às entradas e saídas (SOLLERO; LINS, 2004). A eficiência técnica de uma DMU observada (DMU_o) será obtida por meio da programação linear (PL), que, segundo Taha (2008), possui três componentes básicos: as variáveis de decisão que se procura determinar; o objetivo (ou meta) que se pretende otimizar (maximizar ou minimizar); e as restrições que a solução deve satisfazer. Assim, uma solução do modelo é viável se satisfizer todas as restrições, e, se esta solução além de viável resultar no melhor valor (máximo ou mínimo) da função objetivo, ela é então considerada solução ótima.

Dois modelos básicos DEA constituem-se em referências para a avaliação da eficiência técnica: o modelo CCR e o modelo BCC. O modelo CCR (sigla originária dos autores Cooper, Charnes e Rhodes), também denominado RCE ou CRS (*Constant Returns to Scale*) ou modelo proporcional, foi proposto em 1978 e tem como propriedade principal a proporcionalidade entre *inputs* e *outputs* na fronteira, ou seja, adotam a hipótese de rendimentos constantes de escala, por considerarem que aumentos da produção são proporcionais aos aumentos dos insumos (CHARNES *et al.*, 1978). O modelo RVE ou BCC (sigla advinda dos autores Banker, Charnes e Cooper), também conhecido como VRS (*Variable Returns to Scale*), é considerado inovação ao modelo CCR, pois, com o intuito de analisar economias com rendimentos de escala variáveis, Banker *et al.*, (1984) introduziram uma restrição de convexidade no modelo CCR ao substituir o axioma da proporcionalidade entre *inputs* e *outputs* pelo axioma da convexidade (LINS e ÂNGULO-MEZA, 2000; COOPER *et al.*, 2004; RAY, 2004; LINS; CALÔBA, 2006; FERREIRA; BRAGA, 2007; PIEWTHONGNGAM *et al.*, 2007; COOK; ZHU, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009; GOMES *et al.*, 2009; SOUSA *et al.*, 2009; MULWA; EMROUZNEJAD, 2011). Dessa forma, uma DMU é eficiente, no

modelo BCC, se esta melhor aproveitar os *inputs*, considerando a escala de operação, enquanto no modelo CCR, a DMU é considerada eficiente quando melhor aproveitar os *inputs*, sem levar em conta sua escala de operação (BANKER *et al.*, 1984; FERREIRA; GOMES, 2009).

A Análise Envoltória de Dados analisa três tipos de desempenho técnico das DMUs: a) DMUs fortemente eficientes (folgas de insumos e produtos iguais a zero); b) DMUs fracamente eficientes ou falsos eficientes – são as eficientes com folga (*slack*) em algum insumo ou produto e estão localizadas sobre a fronteira de possibilidades de produção nos segmentos paralelos aos eixos coordenados; e c) DMUs ineficientes – encontram-se fora da fronteira de possibilidades de produção tanto nos modelos com orientação insumo quanto nos orientados a produto (FERREIRA; GOMES, 2009). A Figura 11 ilustra o movimento radial de DMUs.

Figura 11 - Movimento radial das DMUs.



Fonte: Elaborada pela autora com base em Banker *et al.*, 1984 e Lorenzett *et al.*, 2010.

Neste exemplo (Figura 11), foram consideradas cinco DMUs, representadas pelos pontos A, B, C, D e E. Cada DMU utiliza insumo x para produzir y . Tanto os modelos CCR quanto o modelo BCC podem ser aplicados para a construção da fronteira de produção. No modelo CCR, apenas a unidade A é eficiente – considerada padrão de referência (peer) para as demais. Comparadas à DMU_A, as demais DMUs são ineficientes. Também, no modelo BCC, apenas a DMU A é considerada eficiente. As unidades C e D, no modelo BCC, ainda que se encontrem

sobre a fronteira, não são consideradas eficientes (são designadas de “falso-eficientes”, uma vez que C poderia reduzir os insumos mantendo-se a mesma produção e D poderia incrementar a produção mantendo-se a mesma quantidade de insumos. A unidade E apresentou ineficiência nos dois modelos por consumir insumos além do necessário para produzir y_E . Considerando o modelo BCC, apenas x_E' deveria ter sido utilizado para produzir y_E e, levando-se em conta o modelo CCR, apenas x_E'' de insumos deveria ser consumido para a mesma produção.

Ao considerar como exemplo a DMU B, a eficiência técnica dessa organização é determinada pela relação x_{BB} / x_{BB}' (ao aplicar o modelo BCC) e pela relação x_{BB} / x_{BB}'' (ao aplicar o modelo CCR). As projeções B' e B'' podem ser consideradas DMUs virtuais, ambas compostas pelas DMUs referenciais A e C, com as quais B é comparada. Nesse caso, A e C são *benchmarks* de B, sendo A considerada a sua principal parceira de excelência.

Eficiências baseadas na abordagem DEA podem ser determinadas segundo o modelo envoltório ou por meio do modelo dos multiplicadores. De forma simplificada, o primeiro modelo define uma região viável de produção e projeta cada DMU na fronteira dessa região; o segundo modelo trabalha com a razão de somas ponderadas de produtos e recursos, com a ponderação escolhida de maneira mais favorável a cada DMU, respeitando-se determinadas condições (GOMES *et al.*, 2005). Partindo-se do pressuposto básico da Análise Envoltória de Dados de que o número n de DMUs é superior à soma do número de *inputs* (m) mais o número de *outputs* (s), a forma envoltória envolve menor número de restrições que a dos multiplicadores, uma vez que neste existem $(m + s)$ variáveis e, no modelo envoltório, há $(m + s)$ restrições, que é menor que as $(n+1)$ restrições do modelo dos multiplicadores. Com isso, o modelo envoltório é preferível, pois demanda menos tempo para ser solucionado (COELLI *et al.*, 1998; ÂNGULO-MEZA *et al.*, 2005; GOMES; MANGABEIRAS, 2004; LINS; CALÔBA, 2006; CASADO, 2007).

Em razão de, neste trabalho, ter-se a intenção de utilizar a formulação do modelo Envoltório com orientação a insumo, foram expostos respectivamente, em (1) e (2), os modelos DEA CCR_Envoltório e o modelo DEA BCC_Envoltório, com orientação a insumo, baseando-se nos estudos de Fried *et al.*, (1993); Gomes e Baptista (2004); Ray (2004); Mello *et al.*, (2005); Cook e Zhu (2008); Taha (2008); Lins e Calôba (2006); Ali *et al.*, (2009); Ferreira e Gomes (2009).

(1) Eficiência da DMU_o do modelo Envolvório CCR – orientação a insumo

A formulação matemática do modelo CCR original pode ser assim apresentada:

$$\text{Minimizar}_{\theta, \lambda} \quad \theta, \tag{a}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro} \quad \text{para todo } r = 1, 2, \dots, s; \tag{b}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{io} \quad \text{para todo } i = 1, 2, \dots, m; \tag{c}$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \text{para todo } j = 1, 2, \dots, n. \tag{d}$$

Em que:

θ indica o alcance da medida de eficiência relativa, proporção em que os *inputs* podem ser reduzidos.

λ_j representa o peso atribuído aos insumos e aos produtos.

Os vetores x são os insumos e y são os produtos.

y_{rj} indica a saída r produzida por cada DMU_j.

x_{ij} é a entrada i utilizada por cada DMU_j.

A letra grega lambda (λ) representa o peso dado (intensidade da participação) às entradas e saídas da DMU_j.

y_{ro} representa o produto “ r ” da DMU_o (a que está sendo observada).

x_{io} representa o insumo “ i ” da DMU_o.

O problema de programação linear com retornos constantes de escala pode ser modificado para atender à pressuposição de retornos variáveis, adicionando-se a restrição de convexidade $\sum \lambda_j = 1$, em que $\mathbf{1}$ é um vetor ($n \times 1$) de algarismos unitários. Essa abordagem forma uma superfície convexa de planos em interseção, a qual envolve os dados de forma mais compacta que a superfície formada pelo modelo com retornos constantes. Com isso, os valores obtidos para eficiência técnica, com a pressuposição de retornos variáveis, são maiores ou iguais aos obtidos com retornos constantes (FERREIRA; GOMES, 2009; DALBERTO *et al.*, 2013).

(2) Eficiência da DMU_o do modelo Envoltório BCC – orientação a insumo

Neste modelo, a formulação é expressa da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar}_{\theta, \lambda} \quad \theta, \quad (a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro} \quad \text{para todo } r = 1, 2, \dots, s; \quad (b)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{io} \quad \text{para todo } i = 1, 2, \dots, m; \quad (c)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (d)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \text{para todo } j = 1, 2, \dots, n. \quad (e)$$

Observe que a expressão de restrição (d) no modelo Envoltório RVE difere os modelos (1) e (2), pois esta garante a convexidade da fronteira de eficiência. Essa restrição determina uma envoltória VRS (retorno variável em escala). Sem esta restrição, o modelo considera uma envoltória CRS (retorno constante em escala). Conforme Marinho *et al.*, (2012), “essa restrição adicional indica que a região factível, que no modelo CCR é um cone poliédrico convexo limitado inferiormente, torna-se, no modelo BCC, uma região poliédrica convexa, também limitada inferiormente”. Assim, a avaliação relativa das DMUs é mais restrita no modelo BCC, de maneira que esse modelo discrimina menos as unidades. Pode-se demonstrar que uma DMU avaliada como eficiente no modelo CCR será eficiente no modelo BCC. Porém, a recíproca nem sempre é verdadeira.

A DMU_o representa uma das n DMUs sob observação e θ é um escalar, cujo valor será a medida da eficiência técnica da DMU_o (a que está sendo avaliada), estendendo-se à i -ésima DMU, tal que $0 \leq \theta \leq 1$. Isso significa que o resultado de $[1 - \theta]$ indica a proporção em que os *inputs* poderão ser reduzidos. Caso o valor de θ seja = 1, a DMU será eficiente; porém, se $\theta < 1$, a DMU será ineficiente, sujeita à restrição de que todos os escores de eficiência técnica sejam menores ou iguais a um e a redução em cada um dos insumos não deve ultrapassar a fronteira definida pelas DMUs eficientes e não alterar o nível atual dos produtos

da DMU.

Os pesos λ_j , representam a intensidade da participação da DMU_j na construção da DMU_o composta (virtual). Segundo Gomes e Baptista (2004), o parâmetro λ é um vetor ($n \times 1$), cujos valores são calculados para encontrar a solução ótima. Para uma DMU ineficiente, os valores de λ serão os pesos utilizados na combinação linear de outras DMUs eficientes, que irão influenciar a projeção da DMU ineficiente na fronteira calculada. Essas unidades eficientes serão os *benchmarks* (ou parceiras de excelência) daquelas DMUs ineficientes.

As variáveis “ y_{ro} ” e “ x_{io} ” significam, respectivamente, o produto “ r ” e o insumo “ i ” da DMU em observação (ou DMU objetivo), ou seja, a quantidade de *outputs* (produtos) e de *inputs* (insumos) da DMU_o. O escore de eficiência θ e os pesos λ são as variáveis de decisão.

Ao se basear nos modelos (1) e (2), a DMU observada será ineficiente se a DMU referência usar menos insumo, mantendo-se o mesmo nível de produção que ela. Dessa forma, as unidades envolvidas na construção da DMU referência (*target*) podem ser utilizadas como parceiras de excelência para tornar eficiente a DMU em observação.

Ao analisar o modelo (2) “Modelo Envoltório RVE”, a expressão (a) indica orientação insumo. Nesta orientação, os *inputs* são minimizados e os *outputs*, mantidos na mesma quantidade. Esse problema está sujeito às seguintes restrições: **a primeira (b)** garante que a soma ponderada dos *outputs* de todas as DMUs (cada produto multiplicado pelo respectivo peso) seja maior que o *output* da DMU em observação; **a segunda (c)** assegura que a soma ponderada dos *inputs* de todas as DMUs (cada insumo multiplicado pelo respectivo peso) seja menor ou igual ao valor do *input* da DMU_o vezes o escalar θ (que é o escore de eficiência técnica desta DMU); **a terceira (d)** indica que o somatório dos pesos atribuídos a cada DMU seja igual a 1; e, **a quarta restrição (e)** é a condição de não negatividade para os pesos (isto é, os pesos $j = 1, 2, \dots, n$ assumem valores iguais a zero ou positivo).

No modelo envoltório, a medida de eficiência representada pelo escalar θ deve ser multiplicada por todos os insumos para colocar a DMU na fronteira eficiente, por meio de decréscimos nas quantidades de insumos.

Nos modelos (1) e (2), os λ são pesos desconhecidos, e “ $j=1, 2, \dots, n$ ” corresponde ao número de DMUs. Segundo Taha (2008), uma restrição implícita é que as variáveis não podem assumir valores negativos, condição garantida pelas restrições de não negatividade, letras “**d**” e “**e**”, dos modelos (1) e (2), respectivamente.

O modelo (2) deve ser aplicado para cada uma das DMUs, ou seja, n vezes ($j=1,2,\dots, n$), para verificar a eficiência relativa de cada uma delas em relação aos seus pares na amostra. Assim, os problemas 1 e 2 são resolvidos para cada uma das unidades de decisão e, então, se forma a fronteira técnica a partir das DMUs eficientes e as demais posicionadas relativamente a tal fronteira (MARINHO; SOARES; BENEGAS, 2004). A solução de modelos DEA pode ser obtida por uma série de sistemas computacionais específicos existentes no mercado ou pela utilização de aplicativos incluídos em sistemas de planilhas eletrônicas, como *Microsoft Excel*. O aplicativo Solver da planilha eletrônica *Excel* é considerado um recurso com boa capacidade de processamento em uma plataforma de uso popular (FERREIRA; GOMES, 2009; TAHA, 2008; LINS; CALÔBA, 2006). Além disso, é uma ferramenta que facilita a compreensão das especificidades dos métodos de solução dos modelos (KASSAI, 2002).

No APÊNDICE A, desta pesquisa, encontra-se um exemplo simplificado de como avaliar a eficiência relativa de 13 propriedades canaviculoras da Região da Serra dos Aimorés, usando o aplicativo Solver da planilha eletrônica *Excel*.

2.2.5 Eficiência de Escala

O modelo BCC considera tecnologias com rendimentos variáveis de escala; contudo, quando o conjunto de DMUs tem tamanhos diversos e algumas DMUS não estão operando em escala ótima, o uso da especificação de retornos constantes resultará em eficiência técnica que pode ser confundida com eficiência de escala. Todavia, para atingir a melhor situação para uma DMU, sugere-se combinar os modelos de retornos constantes e variáveis no mesmo conjunto de dados. Caso haja diferença nos valores de eficiência técnica de determinada DMU, conclui-se que essa DMU tem ineficiência de escala, que pode ser calculada pela relação entre os valores das medidas de eficiência técnica com retornos variáveis e com retornos constantes (FERREIRA; BRAGA, 2007; FERREIRA; GOMES, 2009).

Uma fronteira com retornos variáveis pode contemplar setores com retornos crescentes e retornos decrescentes. Segundo Banker *et al.*, (1984); Ray (2004); Cook e Zhu (2008); Ferreira e Gomes (2009), ao considerar essas pressuposições, os rendimentos de escala podem apresentar os seguintes comportamentos ou tendências: (i) Rendimentos

constantes de escala (em que as variações nos insumos resultam em variações proporcionais nos produtos); (ii) Rendimentos de escala não decrescentes (crescentes e constantes, em que variações nos insumos provocam variações mais que proporcionais nos produtos); e (iii) Rendimentos não crescentes de escala (constantes e decrescentes, em que variações nos insumos provocam variações menos que proporcionais nos produtos).

Considerando as informações desses autores, a identificação da natureza dos retornos de escala de uma DMU é procedida da aplicação conjunta de modelos derivados do modelo (2). A forma original do modelo (2) considera a pressuposição de retornos variáveis de escala. A substituição da restrição (d) do modelo (2) pelas restrições (f) e (g) permite adaptar este modelo às pressuposições (ii) e (iii), caracterizando os modelos RND e RNC, respectivamente. As restrições (f) e (g) são dadas por:

$$(f) \sum_{j=1}^n \lambda_j \geq 1 \quad e \quad (g) \sum_{j=1}^n \lambda_j \leq 1.$$

Para determinar a natureza da escala de determinada DMU, conforme citado por Gomes e Baptista (2004); Ferreira e Gomes (2009), é preciso verificar como a eficiência técnica (ET) obtida com os modelos RVE, RND e RNC está relacionada:

Se $ET_{RNC} = ET_{RVE} \rightarrow$ retornos decrescentes.

Se $ET_{RNC} \neq ET_{RVE} \rightarrow$ retornos crescentes.

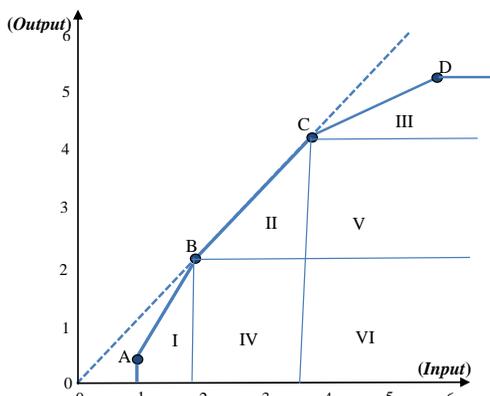
Se $ET_{RND} = ET_{RVE} \rightarrow$ retornos crescentes.

Se $ET_{RND} \neq ET_{RVE} \rightarrow$ retornos decrescentes.

Ferreira e Gomes (2009) ressaltam que, após executados os modelos de Análise Envoltória de Dados, as DMUs podem ser classificadas segundo duas categorias: 1) DMUs tecnicamente eficientes ou ineficientes (eficiência técnica); e 2) DMUs operando com retornos constantes, crescentes ou decrescentes (eficiência de escala). Uma DMU que opera com rendimentos crescentes está abaixo da escala ótima, o que indica a necessidade de expandir a produção. Uma DMU com rendimentos decrescentes mostra produção acima da escala ótima, o que implica necessidade de reduzir a produção ou adotar tecnologias mais apropriadas, isto é, deslocar a função de produção para cima. Uma DMU opera na escala ótima de produção quando é simultaneamente eficiente para os modelos com rendimentos constantes (CCR) e variáveis (RVE). A Figura 12 ilustra as possíveis combinações de insumo e produtos das

DMUs nos modelos DEA, pressupondo-se rendimentos constantes e variáveis. E, no Quadro 2, a explanação das regiões de rendimentos de escala relativa à Figura 12.

Figura 12 - Diferenciações básicas entre os rendimentos de escala.



Fonte: Adaptada de Cook e Zhu, 2008; Ferreira e Gomes, 2009.

Quadro 2 - Explanação das regiões de rendimentos de escala com base na Figura 12.

Região	Tipo de Retorno de Escala
I	Retorno crescente de escala
II	Retorno constante de escala
III	Retorno decrescente de escala
IV	Retorno crescente de escala (orientado a <i>input</i>) e Retorno constante de escala (orientado a <i>output</i>)
V	Retorno constante de escala (orientado a <i>input</i>) e Retorno decrescente de escala (orientado a <i>output</i>)
VI	Retorno crescente de escala (orientado a <i>input</i>) e Retorno decrescente de escala (orientado a <i>output</i>)

Fonte: Adaptada de Cook e Zhu, 2008.

As DMUs B e C, além de se situarem sobre a fronteira eficiente, estão operando em escala de produção eficiente ou igual a 1. O que significa que quando a unidade produtiva com rendimentos variáveis de escala se iguala às características de rendimentos constantes de escala, a eficiência de escala alcança o valor máximo igual a unidade. Dessa forma, esta decomposição da eficiência global mostra a fonte de

ineficiência produtiva operacional e de escala de produção. Assim, tem-se que o resultado da eficiência técnica global é obtido ao multiplicar os valores de eficiência técnica pura com os valores da eficiência de escala. A DMU A, por exemplo, embora tivesse eficiência técnica pura local, não alcançou a melhor escala de produção com a tecnologia utilizada, uma vez que esta DMU operou com ineficiência técnica global, ao considerar rendimentos constantes de escala (COOK; ZHU, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009).

2.2.6 Índice de Produtividade de *Malmquist*

Nos modelos básicos de DEA (RCE e RVE), os dados são modelados para períodos individuais de tempo, uma vez que a análise do desempenho da eficiência é feita em períodos de tempos iguais (COSTA, 2012). Nos estudos de competitividade, considera-se importante o aumento da produtividade técnica produtiva ao longo do tempo (RAY, 2004; COOK; ZHU, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009; COSTA, 2012). Assim, pode-se encontrar, na literatura, uma variedade de números índices para analisar mudanças de produtividade entre períodos, por exemplo, os de *Malmquist*, os de *Fisher* e o de *Törnqvist*. O índice de *Malmquist*, ao contrário dos de *Törnqvist* e *Fisher*, não requer informações sobre preços (receitas e despesas), o que o torna preferido na análise de mudanças na produtividade total dos fatores (FÄRE *et al.*, 1994; LOVELL, 1996; LOVELL, 2003; FERREIRA; GOMES, 2009).

O índice de *Malmquist* foi inicialmente proposto por Sten Malmquist na análise do comportamento do consumidor (MALMQUIST, 1953; LOVELL, 1996). Nesse estudo, Malmquist sugeriu comparar a quantidade de insumos utilizados por uma firma entre dois períodos de tempo e com a mesma quantidade de produto. Caves, Christensen e Diewert, em 1982, introduziram o conceito de índice de *Malmquist* na análise da produção; e, em 1994, Färe e colaboradores reconheceram que a função distância – que são representações de tecnologias com múltiplos *inputs* e *outputs* que podem apenas requerer dados sobre quantidades de *inputs* e de *outputs* –, implícita no índice de *Malmquist*, era recíproca à avaliação da eficiência técnica proposta por Farrell em 1957; e, então, desenvolveram o modelo “Índice de produtividade *Malmquist*” para avaliar a produtividade de DMUs, ao longo do tempo. Esse modelo contempla componentes de

mudança de eficiência técnica e de tecnologia ao longo do tempo. Para tanto, utilizaram a programação linear baseada na Análise Envoltória de Dados, para o cálculo do índice de *Malmquist* em medidas de produtividade (THRALL, 2000; LOVELL, 2003; RAY, 2004; COOK; ZHU, 2008; FERREIRA; GOMES, 2009).

Nesse contexto, o Índice de *Malmquist* mostra o crescimento da produtividade total dos fatores de produção (PTF) ou *total factor productivity* (TFP) das DMUs, na medida em que reflete as alterações em termos de eficiência técnica aliadas às mudanças no progresso tecnológico entre períodos de tempo distintos, admitindo-se o emprego de múltiplos *inputs* que geram múltiplos *outputs* (COOPER; SEIFORD; TONE, 2007; COOK; ZHU, 2008; COSTA, 2012). O Índice de *Malmquist* é dividido em dois tipos de efeitos: emparelhamento (*catch-up effect*) e deslocamento da fronteira eficiente (*frontier-shift effect*). No primeiro caso, analisa-se a variação da eficiência técnica produtiva ao longo do tempo. Neste, verificam-se melhorias contínuas no processo de produção e nos produtos, dada uma mesma tecnologia. O segundo caso reflete os avanços na produtividade de uma DMU, devido às inovações tecnológicas (LOVELL, 2003; FERREIRA; GOMES, 2009; COSTA, 2012).

O índice de *Malmquist*-DEA (M_o) é calculado por meio da média geométrica de dois índices. No primeiro, usa como referência a fronteira do período base “t-1” (anterior) e, no segundo, a fronteira do período “t” (atual). Assim, um valor de $M_o > 1$ indica evolução da produtividade total dos fatores (PTF) entre os períodos “t” e “t-1”, ao passo que um valor de $M_o < 1$ indica declínio de produtividade (LOBO *et al.*, 2008).

Conforme Lobo *et al.*, (2008), o índice de *Malmquist* orientado a insumo é dado por:

$$M_o = \left[\frac{d_o^{t-1}(X_o^t, Y_o^t)}{d_o^{t-1}(X_o^{t-1}, Y_o^{t-1})} * \frac{d_o^t(X_o^t, Y_o^t)}{d_o^t(X_o^{t-1}, Y_o^{t-1})} \right]^{1/2}$$

Em que:

$d_o^{t-1}(X_o^t, Y_o^t)$ corresponde à medida de avaliação da eficiência técnica da DMU_o no período t-1, obtida com as observações de todas as DMUs no período “t-1”, ou seja, $d_o^{t-1}(X_o^{t-1}, Y_o^{t-1}) = \theta_o^{t-1}$,

$d_o^t(X_o^t, Y_o^t)$ corresponde à medida de avaliação da eficiência técnica da DMU_o no período “t”, obtida com as observações de todas as DMUs no período “t”, ou seja, $d_o^t(X_o^t, Y_o^t) = \theta_o^t$,

$d_o^{t-1}(x_o^t, y_o^t)$ corresponde à avaliação da eficiência técnica da DMU_o obtida ao substituir os dados da DMU_o no período “t-1” por aqueles do período “t”, desde que as observações das demais DMUs tenham sido realizadas no período “t-1”.

$d_o^t(x_o^{t-1}, y_o^{t-1})$ corresponde à avaliação da eficiência técnica da DMU_o obtida ao substituir os dados da DMU_o no período “t” por aqueles do período “t-1”, desde que as observações das demais DMUs tenham sido realizadas no período “t”.

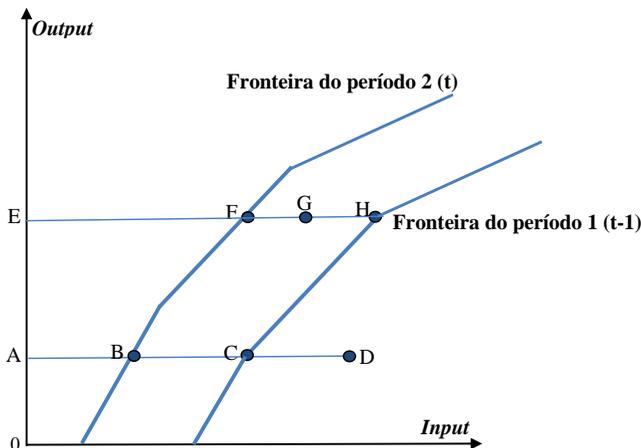
Ainda conforme Lobo *et al.*, (2008), o índice de *Malmquist*, por meio da sua forma decomposta, permite separar as fontes de variação de produtividade em mudança técnica e mudança tecnológica:

$$M_o(x_t, y_t, x_{t-1}, y_{t-1}) = \frac{d_o^t(x_t, y_t)}{d_o^{t-1}(x_{t-1}, y_{t-1})} * \left[\frac{d_o^{t-1}(x_t, y_t)}{d_o^t(x_t, y_t)} * \frac{d_o^{t-1}(x_{t-1}, y_{t-1})}{d_o^t(x_{t-1}, y_{t-1})} \right]^{1/2}$$

A primeira expressão (fora das chaves) avalia a mudança na eficiência relativa da unidade observada e é chamada de variação técnica ou *Catch-up*. Esta razão verifica o comportamento da produção da unidade em relação à fronteira. A média geométrica das expressões (entre chaves) mede a variação da fronteira tecnológica entre dois períodos avaliados em “t-1” e “t” e é chamada de variação na eficiência tecnológica ou *Frontier Shift*. A análise individual dessas expressões é importante, uma vez que permite identificar se uma eventual mudança da eficiência relativa de um período para outro deve ser atribuída ao aumento da produtividade da unidade observada ou à contração da fronteira de produção (LOBO *et al.*, 2008).

A comparação entre a eficiência técnica entre dois períodos de tempo (emparelhamento ou *catch-up effect*), utilizando-se a Análise envoltória de Dados, é mostrada na Figura 13.

O Índice de *Malmquist* é obtido por meio da multiplicação da variação da eficiência técnica global (ETG) com a variação da eficiência tecnológica (ET). Entende-se por eficiência técnica quando, uma vez fixados os *inputs*, uma DMU apresenta incremento de produção, ou fixada a produção, a DMU que utiliza a menor quantidade de *inputs* no processo produtivo. A eficiência tecnológica é a maneira de combinar diferentes insumos para transformá-los em produtos, ou seja, é o processo de produção.

Figura 13 - Emparelhamento e progresso técnico entre dois períodos de tempo.

Fonte: Adaptada de Cook e Zhu, 2008; Ferreira e Gomes, 2009.

Os deslocamentos no sentido da fronteira tecnológica (*frontier-shift*) entre os pontos nos tempos “*t*” e “*t-1*” indicam ganhos de eficiência no índice de *Malmquist*. Ganhos de eficiência técnica na produção permite às DMUs ganho na produtividade total dos fatores (PTF), caso não tenha havido regressão tecnológica (FERREIRA; GOMES, 2009).

O efeito de emparelhamento é, portanto, determinado pelos escores de eficiência técnica medidos pelas distâncias das DMUs às respectivas fronteiras eficientes (FERREIRA; GOMES, 2009). Assim, de acordo com Färe *et al.*, (1994), melhoria na produtividade é encontrada quando o índice de *Malmquist* é maior que uma unidade e há regressão do desempenho, ao longo do tempo, quando o índice de *Malmquist* é menor que uma unidade.

Na Figura 13, considerando-se o período base como “*t-1*” e o período atual como “*t*”, as mudanças na eficiência técnica global (ETG) ou *change in efficiency* podem ser descritas da seguinte maneira: Se o resultado da operação “ $ETG = (EF/EG)/(AC/AD)$ ” for > 1 indica progresso técnico; se < 1 representa regresso técnico; e se $= 1$ permanece a mesma eficiência técnica.

Os avanços na produtividade de uma DMU podem ser em razão de inovações tecnológicas, e, com isso, pode ocorrer deslocamento da fronteira resultante da introdução de novas tecnologias, ou seja,

tecnologias que produzem melhor produto com menor utilização de insumos ou que utilizam insumos semelhantes para produzirem com maior rapidez e perfeição produtos semelhantes (FERREIRA; GOMES, 2009). Considerando a Figura 13, como exemplo, a mudança de tecnologia (ET) ou *technical change* pode ser assim descrita: $ET = (AC/AD)/(AB/AD)$. Caso o resultado desta operação for > 1 indica progresso na tecnologia; se < 1 indica regresso tecnológica e se $= 1$ permanece a mesma tecnologia.

O índice de *Malmquist* é composto pelo efeito de emparelhamento da fronteira (*catch-up effect*) ou efeito da mudança técnica (ETG) e o efeito de deslocamento da fronteira (*frontier-shift effect*) ou efeito da mudança tecnológica (ET). Assim, o IPTF (Índice de *Malmquist*), com eficiências técnicas orientadas a insumo, entre os períodos “t-1” e “t” é obtido por meio da multiplicação de $ETG * ET$, ou $(EF/EG)/(AB/AD)$ ou $(EA/EG)/(AC/AD)$. Em que:

- a) Se $IPTF > 1$: a produtividade da DMU em observação melhorou ao longo do tempo.
- b) Se $IPTF < 1$: a produtividade da DMU em observação piorou.
- c) Se $IPTF = 1$: a produtividade da DMU em observação permaneceu a mesma.

Equações complementares da composição do índice de produtividade Malmquist podem ser resgatadas em Ray (2004); Cook e Zhu (2008); Ferreira e Gomes (2009).

Conforme Ferreira e Gomes (2009), são necessárias três condições para identificar quais unidades de produção estão deslocando a fronteira tecnológica (efeito frontier shift) entre dois períodos de tempo (t-1 e t):

$$\left[\frac{d_o^{t-1}(x_t, y_t)}{d_o^t(x_t, y_t)} * \frac{d_o^{t-1}(x_{t-1}, y_{t-1})}{d_o^t(x_{t-1}, y_{t-1})} \right]^{\frac{1}{2}} > 1, \quad (1)$$

$$d_o^{t-1}(x_t, y_t) > 1, \quad (2)$$

$$d_o^t(x_t, y_t) = 1. \quad (3)$$

De acordo com a primeira condição, apresentada em (1), é necessário que haja mudança tecnológica. A segunda condição (2) é que, se o produto da unidade de produção no período “t” for superior ao

máximo produto potencial que poderia ser obtido no período “t-1”, utilizando-se as mesmas quantidades de fatores de produção do período “t”, haverá progresso tecnológico, e a unidade de produção poderá estar deslocando a fronteira de produção. A terceira condição (3) indica se houver deslocamento da fronteira de produção, a unidade de produção deve estar situada sobre ela.

Pela literatura exposta neste capítulo, pode-se considerar que a abordagem DEA baseada no índice de produtividade *Malmquist* tem mostrado ser boa ferramenta para medir mudanças de produtividade entre unidades tomadoras de decisão.

2.2.7 Características e Limitações da Análise Envoltória de Dados

A Análise Envoltória de Dados é aplicável em organizações que sejam caracterizadas por vários insumos e produtos simultaneamente, com possibilidades de que os produtos e os insumos tenham unidades de medidas diferentes. As diferenças de porte podem ser tratadas com a adoção de modelos que prevejam retornos variáveis à escala, sem prejuízo às empresas de pequeno porte (KASSAI, 2002; CALVO, 2002).

Nesta abordagem, segundo Reis *et al.*, (2011); Delgado e Machado (2007); Ferreira e Gomes (2009), a eficiência de cada empresa é definida de forma individualizada, considerando a atuação das demais empresas em estudo e, nesta, não é preciso admitir nenhuma hipótese quanto à forma funcional para a fronteira de eficiência, uma vez que este modelo capta a melhor prática da organização produtiva e cria um referencial (*benchmarking*) para as organizações (DMUs) analisadas; apresentando contribuições de melhoria, com o estabelecimento de metas de atuação, para as empresas consideradas ineficientes.

A DEA pode ser aplicada em atividades que abrangem diversos períodos de tempo, possibilitando a verificação da evolução da eficiência das empresas e o estudo dos fatores que contribuíram para seu crescimento ou não crescimento. Em determinados cenários, mais de uma empresa pode ser classificada como eficiente, compondo a fronteira de eficiência relativa e servindo de referência para a atuação das demais empresas (REIS *et al.*, 2011; FERREIRA; GOMES, 2009).

Contudo, Lins e Ângulo-Meza (2000) destacam que a Análise Envoltória de Dados possui algumas limitações, como a de não possibilitar relações de causa e efeito entre as variáveis e não permitir

extrapolar as conclusões, que estão restritas às organizações e às variáveis em análise, visto que qualquer alteração nas variáveis ou nas unidades modificaria o resultado global e, principalmente, por ser muito sensível a erros de medida que podem comprometer a análise.

2.2.8 Etapas de Implementação de DEA

Conforme Golany e Roll (1989); Lins e Moreira (2000); Mello *et al.*, (2003); Vilela *et al.*, (2007); Ferreira e Gomes (2009, em uma modelagem por Análise Envoltória de Dados devem-se cumprir três etapas:

1ª Etapa: Definir e selecionar as DMUs (Unidades Tomadoras de Decisão)

Nesta fase, determina-se o conjunto de DMUs homogêneas a serem avaliadas, ou seja, definem-se e selecionam-se as DMUs a serem analisadas.

Lins e Moreira (2000) lembram que uma vez definidas as DMUs, estas devem ser no mínimo o dobro do número de variáveis utilizadas no modelo, para alcançar um nível razoável de discriminação. Para estes autores, o número de variáveis empregadas no cálculo da DEA deve ser o mais compacto possível, a fim de potencializar o poder discriminatório da análise envoltória. Assim, grande número de variáveis de *inputs* e *outputs* pode ser prejudicial para a obtenção dos resultados.

Segundo Ferreira e Gomes (2009, p. 87), “uma recomendação prática nos trabalhos mais recentes é a de que nos modelos DEA o número de DMUs seja no mínimo quatro a cinco vezes maior que o número de variáveis (insumos + produtos), para que haja pelo menos uma face de dimensão completa na fronteira eficiente, ou seja, sem pesos (multiplicadores) zero”. Por outro lado, o poder discriminatório da Análise Envoltória de Dados (DEA) em problemas que contenham elevado número de variáveis pode ser muito fraco, o que dificulta o uso de DEA como ferramenta de Multicritério. Assim, a quantidade de *inputs* e *outputs* empregada no modelo não deve ser em demasia, uma vez que quanto maior o número de fatores, menor o nível de discriminação do modelo, pois quando se usa grande quantidade de variáveis e pequena quantidade de unidades, atribui-se 100% de eficiência a um grande número de DMUs (ÂNGULO-MEZA; SANTOS, 2007; GOMES, 2009), o que reduz a capacidade do DEA em

discriminar unidades eficientes de ineficientes (LIMA, 2011). O importante é procurar um ponto de equilíbrio na quantidade de variáveis e DMUs escolhidas, visando aumentar o poder discriminatório de DEA.

2a Etapa: Selecionar as variáveis

Nesta segunda fase, selecionam-se as variáveis (*input* e *output*) relevantes e apropriadas para estabelecer a eficiência relativa dessas DMUs, a partir de uma grande lista de possíveis variáveis a serem consideradas no modelo. Assim, permite-se obter maior conhecimento sobre as unidades a serem avaliadas, explicando melhor suas diferenças. Estas variáveis podem ser controláveis ou não, quantitativas ou qualitativas. Conforme Gomes *et al.*, (2009), a etapa de seleção das variáveis em DEA é de grande importância, pois dela depende a qualidade dos resultados. Assim, um modelo com grande número de variáveis pode acarretar uma avaliação extremamente benevolente, com várias DMUs eficientes.

Lins e Moreira (2000) afirmam que, na seleção das variáveis, pode-se levar em consideração, exclusivamente, a opinião do pesquisador ou especialista, desde que se considerem a relevância, a confiabilidade, a abrangência e a contribuição da variável para a aplicabilidade da técnica.

3a Etapa: Escolher e aplicar o modelo

A terceira fase é a aplicação dos modelos DEA, quando é necessário definir, além do modelo, se o modelo será orientado para *input* ou para *output*.

De acordo com Gomes (1999, p. 43), o método DEA possui uma pressuposição fundamental de que:

[...] se certa empresa A é capaz de produzir $Y(A)$ unidades de produto, utilizando $X(A)$ unidades de insumos, qualquer outra empresa homogênea também tem a mesma capacidade de produção, caso opere eficientemente. De forma idêntica, se uma empresa B é capaz de produzir $Y(B)$ unidades de produto, utilizando $X(B)$ unidades de insumos, então quaisquer outras empresas homogêneas seriam capazes de, em mesmas condições, gerar a mesma produção. Caso as empresas A e B sejam eficientes, elas podem ser combinadas para formar uma empresa composta, que utiliza uma combinação de insumos para produzir uma combinação de produtos.

Como essa empresa normalmente não existe ela é denominada empresa virtual.

Da mesma forma, Lopes *et al.*, (2011, p. 6) afirmam que:

O pressuposto básico do método DEA é que se uma unidade produtiva (UP)A é capaz de produzir $Y(A)$ unidades de resultados com $X(A)$ recursos, então outras UPs deveriam também ser capazes de fazer o mesmo se elas estivessem operando de forma eficiente. Similarmente, se uma UP B é capaz de produzir $Y(B)$ unidades de resultados com $X(B)$ recursos, então outras UPs deveriam também ser capazes do mesmo esquema de produção. As UPs A, B, e outras podem ser combinadas de maneira a formar uma UP constituída com resultados e recursos compostos. Desde que esta unidade produtiva (UP) não existe necessariamente, ela é muitas vezes chamada de UP virtual. O coração da análise está em encontrar a melhor UP virtual para cada UP real. Se a UP virtual é melhor do que a UP original gerando mais resultados com a mesma quantidade de recursos (ou menos), então a UP real é ineficiente. O procedimento de encontrar a melhor UP virtual pode ser formulado como um modelo de programação linear. Analisar a eficiência das n UPs é então um conjunto de n problemas de programação linear.

2.2.9 Estudos de Aplicações de DEA no Setor do Agronegócio

As aplicações iniciais de DEA foram predominantemente sobre organizações sem fins lucrativos, no entanto, um número crescente de pesquisadores vem utilizando DEA na avaliação do desempenho de diferentes entidades (LOPES *et al.*, 2011). A seguir, serão apresentados estudos que utilizaram a DEA na agricultura, atividade zootécnica e agroindustrial, assim como em outros setores organizacionais.

a) Na agricultura

Adhikari e Bjorndal (2012) verificaram a eficiência técnica em fazendas da região de Nepal utilizando-se a função estocástica SDF (fator de desconto contingente aos diversos possíveis estados da natureza) e DEA. Nesta região, há pouca disponibilidade de terreno agricultável, portanto, a demanda por alimentos tem de ser satisfeita por

meio da melhoria produtiva. Identificaram-se alto grau de ineficiência técnica na agricultura daquele país e retornos decrescentes de escala. Assim, sugeriram aumento da produtividade, por meio da utilização de técnicas eficientes, mantendo-se o atual nível de insumos e recursos. Concluíram que a propriedade da terra, qualificação dos agricultores, manejo adequado do solo, instalações de irrigação poderiam ser boas estratégias para que as propriedades se tornassem eficientes.

Bozoğlu *et al.*, (2007) avaliaram a eficiência técnica de 75 propriedades rurais na Turquia, usando a Análise de Fronteira Estocástica para avaliar a eficiência técnica dessas propriedades. Os resultados de eficiência técnica oscilaram entre 0,56 e 0,95 (0,82 de média). Estes pesquisadores afirmaram que a escolaridade, experiência e difícil acesso ao crédito agrícola contribuíram para a ineficiência da maioria das propriedades estudadas.

Estudos sobre avaliação da sustentabilidade na agricultura foram feitos por Reig-Martinez e Gomez-Limon *et al.*, (2011), com o objetivo de construir um modelo (com base em 12 indicadores econômicos, sociais e ambientais) para avaliar a eficiência de 163 fazendas no Planalto Norte da Espanha. Na construção do modelo, os autores combinaram técnicas de DEA e de MCDM (*multicriteria decision-making*). Houve correlação positiva entre os resultados econômicos e ambientais. Ao contrário, o indicador social não correlacionou com os indicadores econômicos e ambientais. O indicador de sustentabilidade total foi maior em fazendas de médio e grande portes. Segundo os autores, isso se deve à associação destas às cooperativas agrícolas e em razão de os agricultores terem nível educacional especializado. Surpreendentemente, a sustentabilidade diminuiu quando o agricultor possuía grau mais elevado de educação. Acreditando-se que o absenteísmo ou tempo parcial de dedicação às atividades rurais contribuíram para este resultado, uma vez que esses agricultores são propensos a seguirem carreiras não agrícolas e a gerenciarem suas fazendas com menos cuidado profissional. Assim, sustentaram a ideia de que o tamanho da propriedade, a participação de cooperativas de agricultores, a educação agrícola especializada e treinamentos rotineiros exerceram influência positiva sobre a sustentabilidade agrícola.

Para avaliar a eficiência alocativa de 97 fazendas de damasco seco em Malatya, na Turquia, Gunduz *et al.*, (2011) utilizaram a abordagem DEA, orientação insumo, para avaliar a eficiência e o método *Tobit* para determinar fatores socioeconômicos. Os *inputs* utilizados foram terreno (ha), trabalho (hora), máquina (hora),

combustível (L), adubo (kg) e fungicida (kg) e a produção de damasco seco (kg) foi considerada como *output*. As grandes fazendas foram economicamente eficientes em comparação às pequenas. Observou-se que a maioria das propriedades operaram com retornos crescentes de escala; porém, em algumas grandes propriedades ocorreram retornos constantes de escala de produção. Os autores sugerem reduções substanciais nos insumos e propõem ações de reestruturação das fazendas, aperfeiçoamento no controle de custos e acesso do agricultor à informação via serviços de extensão e programas de treinamento. Concluem que o incremento na produção poderia ser alcançado por meio do uso eficiente de tecnologias, uma vez que muitos agricultores não adotam as melhores tecnologias disponíveis ou as utilizam de forma inadequada ou contentam com métodos antigos de produção.

A pesquisa de Piewthongngam *et al.*, (2007) aproximou-se de um dos objetivos deste estudo; esses autores utilizaram a DEA para avaliar a eficiência de produtores de cana Tailândia. Porém, alguns procedimentos metodológicos adotados pelos autores diferem dos desta pesquisa, quais sejam:

- a) Avaliou-se a eficiência relativa entre grupos de propriedades agrícolas (propriedades de grande, média e pequena escala de produção) e entre grandes, médios e pequenos produtores de cana. Posteriormente, essas propriedades foram divididas em subgrupos e avaliadas de acordo com a estrutura do solo (arenoso e argiloso) e disponibilidade de irrigação sobre a terra (cana irrigada e de sequeiro). No entanto, não foi avaliada a eficiência de cada propriedade, conforme neste trabalho;
- b) Os *inputs* foram: custo de manejo, de plantio, de colheita e outros custos (incluindo adubação, herbicida e irrigação) por unidade de terra. E, como *output*, considerou-se a receita da cana;
- c) No estudo tailandês considerou-se apenas um ciclo da cana (safra 2005/2006), enquanto nesta pesquisa analisaram-se a eficiência por ciclo e a eficiência acumulada em cinco colheitas, correspondendo às safras 2006-2007; 2007-2008; 2008-2009; 2009-2010; e 2010- 2011;
- d) O modelo DEA utilizado pelos autores foi o retorno constante de escala, enquanto nesta pesquisa usaram-se as abordagens DEA retorno variável de escala e o índice de produtividade de *Malmquist*.

Já Mulwa e Emrouznejad (2011) avaliaram a eficiência produtiva do setor sucroalcooleiro empregando os indicadores *Nerlovian* e *Metafrontier* e técnicas de DEA. Utilizaram como *input* a produção de cana e como *output* o lucro sobre a venda da cana. Observaram ineficiência técnica e alocativa em todas as regiões; porém, os piores indicadores de ineficiência referiram-se aos da alocativa.

b) Na atividade zootécnica

Armagan e Nizam (2012) avaliaram a eficiência em 100 fazendas leiteiras, na Turquia. Neste estudo, 15 fazendas trabalharam com uma taxa de eficiência de 100%. Na análise envoltória, os *inputs* foram capital, trabalho e os animais, e o *output*, os indicadores de produtividade. A menor taxa foi 43% e a média 79%. Conforme estes autores, para a melhoria dos níveis de produtividade sugere-se que os produtores tenham acesso aos programas de pesquisa e extensão. Questionou-se também a possibilidade de redução de insumos, mantendo-se o nível de produção e sem perder a qualidade do produto, e seleção de um plantel de animais mais produtivos.

Cabrera *et al.*, (2010) examinaram os efeitos das práticas usadas e da intensificação da pecuária no desempenho de 273 fazendas leiteiras, em Wisconsin. Para tanto, foi estimada uma fronteira de produção estocástica, simultaneamente, com o modelo de eficiência técnica, com retornos constantes de escala. Neste estudo, os autores observaram que a eficiência das fazendas está relacionada à intensificação da exploração, ao nível de contribuição do trabalho familiar, ao uso de um sistema alimentar “ração mista” e à frequência das ordenhas.

Chang e Mishra (2011), nos Estados Unidos, avaliaram o efeito de pagamentos “MILC” (*Milk Income Loss Contract* – programa de compensação aos produtores de leite quando os preços do leite estão abaixo de um nível especificado) sobre a eficiência técnica das explorações leiteiras em fazendas de pequeno, médio e grande portes. Com base no modelo de regressão Tobit e DEA, os resultados da pesquisa indicaram que os efeitos dos pagamentos “MILC” foram significativos apenas entre as grandes fazendas.

Em Minas Gerais, Gonçalves *et al.*, (2008) mensuraram as eficiências técnica e de escala de 771 propriedades produtoras de leite. Foram usados o modelo econométrico *Tobit* e o DEA. Verificou-se, com base no resultado desse estudo, que a maior parte das propriedades apresentaram ineficiência técnica e que os pequenos produtores têm potencial para expandir suas produções e produtividades, aumentando a

eficiência técnica. Entretanto, os grandes produtores apresentaram eficiência técnica, explicada, em parte, pela presença de fatores como acesso ao crédito rural, treinamento e assistência técnica.

Hansson (2007) avaliou o desempenho de fazendas de gado leiteiro na Suécia, utilizando o modelo econométrico *Tobit* e o DEA. A localização geográfica, clima e solo, escala de produção, maquinários e eventuais diferenças de cultura empresarial foram significativos para o desempenho agrícola das fazendas. Ao passo que, também usando o modelo *Tobit* e DEA, Begum *et al.*, (2012) avaliaram as eficiências técnica e alocativa de 75 granjas avícolas em Bangladesh. As granjas relativamente eficientes foram parceiras de excelência para as ineficientes. As informações sobre a influência de variáveis na eficiência técnica, eficiência alocativa também foram destacadas.

c) Na agroindústria

Com o auxílio de um modelo paramétrico (*Weibull*) e DEA, Dimara *et al.*, (2008) examinaram os efeitos da eficiência produtiva na sobrevivência das empresas do setor alimentar grego. Os resultados evidenciaram que a evolução da biotecnologia, das redes de abastecimento de alimentos alternativos, as inovações no setor de alimentos e a concorrência afetaram positivamente a eficiência técnica e de escala das empresas estudadas.

Dios-Palomares e Martínez-Paz (2011) mostraram o nível de eficiência técnica e o impacto ambiental do processo produtivo da indústria de azeite espanhola. Com base em resultados das entrevistas (pesquisa Delphi), foram construídos indicadores e elaborada uma fronteira de produção. Pelos resultados, pode-se constatar nível médio-alto de desempenho técnico relativo e a importância dos fatores de eficiência que envolvem associações de produção e *marketing*.

Em 2004, Hasnah e colaboradores estudaram o desempenho dos pequenos produtores de óleo de palma por meio de DEA e Fronteira Estocástica. Neste estudo, os *inputs* foram sementes, fertilizantes, herbicidas, outros produtos químicos e mão de obra; a produção de óleo foi considerada *output*. Os resultados indicaram que 66% dos produtores foram ineficientes na utilização dos insumos.

Macedo *et al.*, (2010) avaliaram o desempenho social de 19 usinas brasileiras de cana-de-açúcar. Aplicaram o modelo CCR e utilizaram como *input* a receita líquida e, como *outputs*, os indicadores sociais internos; indicadores sociais externos e indicadores ambientais. A empresa Agrovale (principal *benchmark*) apresentou o melhor e a São

José Estiva, o menor desempenho socioambiental. Por sua vez, Mulwa *et al.*, (2009) verificaram a eficiência e a produtividade da indústria de açúcar no Quênia, no período de 1980 a 2000. Foram usados os modelos CCR e BCC, utilizando-se cana-de-açúcar, capital, trabalho, produtos químicos e energia como *inputs*, e toneladas de cana como *outputs*. Ambas as metodologias mostraram declínio nos níveis de eficiência a partir de 1992, atingindo o menor nível em 1998.

Salgado Junior *et al.*, (2009) usaram o modelo BCC para analisar a relação entre o tamanho e a eficiência operacional de 26 usinas sucroalcooleiras paulistas. Neste estudo, foram considerados *inputs* a área plantada, número de funcionários, consumo de fertilizantes e cana processada e, *outputs*, a produção de álcool e açúcar. Não foi verificada relação direta entre tamanho e eficiência operacional.

Para avaliar a eficiência na indústria brasileira de base florestal, Santos (2011) utilizou a receita líquida como *output* e o total do custo das operações industriais (COI) e as remunerações do setor (SRO) como *inputs*. Dos 14 estados analisados, Espírito Santo foi o que atingiu a taxa de 100% de eficiência e Rio de Janeiro a maior taxa de ineficiência. Outros 12 estados foram tecnicamente ineficientes. Verificou-se que, no Brasil, o COI foi a principal causa da ineficiência técnica.

A DEA tem sido bastante difundida em outros setores nacionais e internacionais, pois há estudos com essa abordagem em hospitais e na área da saúde (BELLONI, 2000; WOLFF, 2005; SOUZA; MACEDO, 2008); no ensino básico e superior (GRAMANI; DUARTE, 2011); em programas de pós-graduação (MOREIRA *et al.*, 2011); em companhias aéreas brasileiras (CORREIA *et al.*, 2011); em instituições financeiras (BUENO *et al.*, 2011; VILELA; NAGANO; MERLO, 2007; AFTAB *et al.*, 2011; XIONG *et al.*, 2011; ZHENG *et al.*, 2011); em empresas familiares (ORO *et al.*, 2009); na administração pública (PEÑA, 2008); em centrais elétricas (PESSANHA *et al.*, 2010; ZHANG *et al.*, 2011); na indústria mecânica (YANG *et al.*, 2011; SOUZA; ARPINO, 2011); no setor de serviços (AMADO *et al.*, 2012) e na área ambiental (SUEYOSHI; GOTO, 2012; SIMÕES; MARQUES, 2009).

2.2.10 Estudos de Aplicações de *Malmquist* no Setor do Agronegócio

Marinho e Carvalho (2004) analisaram a produtividade total, as mudanças de eficiência técnica e tecnológica do PIB agrícola das regiões brasileiras no período de 1970 a 1995, utilizando o índice de

Malmquist e o modelo de fronteira de metaprodução estocástica. As variáveis foram financiamento e investimentos em terra, recursos humanos e máquinas. Em relação à produtividade total, todas as regiões brasileiras apresentaram ganhos, e que as variações tecnológicas tiveram maior influência que as variações na eficiência técnica.

Ali, Singh e Ekanem (2009) avaliaram a eficiência técnica, tecnológica e mudança de produtividade, no período de 1980-1981 a 2001-2002, em 12 grandes segmentos da indústria alimentícia indiana. Com base nos métodos *Malmquist*-DEA, avaliaram, ao longo do tempo, o fator de produtividade total dessas indústrias. Os *inputs* foram o capital, trabalho, matéria-prima e energia elétrica e, o *output*, o faturamento das indústrias. Os resultados indicaram que a indústria necessita modernizar o sistema de produção para melhor aproveitar a capacidade de utilização dos *inputs*; principalmente matéria-prima, uma vez que esta representou cerca de 85% dos custos de produção.

Ismail (2009) analisou a mudança de eficiência técnica e tecnológica em um grupo de indústrias alimentícias da Malásia, no período de 1985-2003. Para tanto, foi utilizado o índice *Malmquist* (DEA). Nesse estudo, houve regresso técnico e tecnológico na maioria das indústrias do setor. Mulwa *et al.*, (2012) verificaram Produtividade Total dos Fatores (PTF) em lavouras canavieiras no Quênia. Neste estudo, foram ilustradas as diferenças entre as medidas de índice de *Malmquist* convencionais em que a variável ambiente não esteve ajustada e medidas de índice de *Malmquist* ajustadas ao ambiente usando funções distância, hiperbólicas e indicadores *Luenberger*.

Graham (2009) analisou o aumento da produtividade e o impacto ambiental da aplicação de fertilizantes nas fazendas do Sudeste da Austrália, utilizando um modelo biofísico e o índice de *Malmquist*/DEA. Com base nos resultados da pesquisa, os autores constataram aumento de produtividade; porém, houve também aumento das perdas por lixiviação dos fertilizantes aplicados nos solos dessas propriedades.

O estudo de Coelli e Rao (2003) aproximou-se de um dos objetivos desta pesquisa. Esses autores avaliaram as mudanças de produção e produtividade na agricultura em 93 países desenvolvidos e em desenvolvimento, entre 1980 e 2000, utilizando Índice de *Malmquist*. As variáveis de *input* foram hectares de terra, unidades animal (rebanho), horas-máquina, horas-homem, infraestrutura associada à irrigação e quantidade de fertilizantes; e, as variáveis de *output* foram as *commodities* “produtos agrícolas e produção de carne de diferentes animais”. No decorrer dessas duas décadas, a China foi

classificada como a DMU com maior ganho de IPTF. Esse, atribuído, principalmente, ao maior progresso técnico relativo aos dos demais países analisados. O Brasil, por sua vez, apresentou ganho de apenas 2% no IPTF, com baixos números-índice de progressos técnico e tecnológico, respectivamente 0,1 e 1,9%. Porém, 19 países tiveram perdas de produtividade, dentre estes estão inseridos dois países sul americanos – Argentina e Paraguai – devido à ocorrência de regresso tecnológico, uma vez que estes, em relação à eficiência técnica relativa, mantiveram-se constantes na fronteira de eficiência.

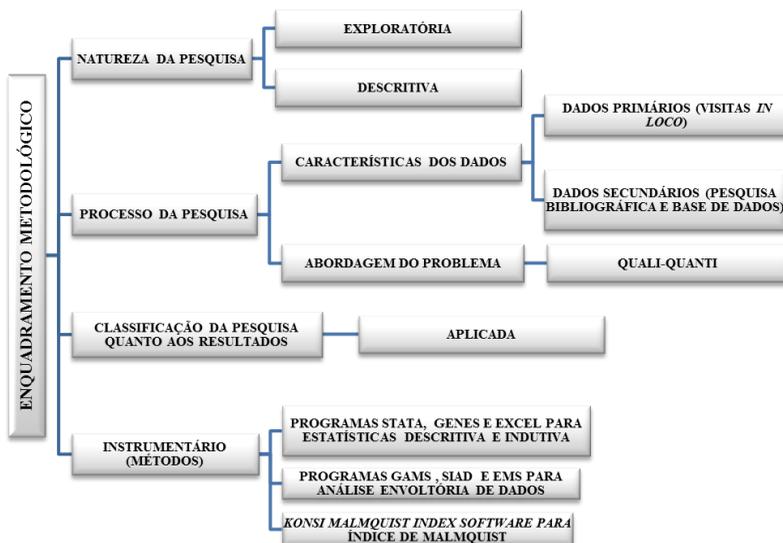
3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta parte do trabalho, além de descrever o local do estudo, apresentam-se o enquadramento metodológico e os procedimentos da pesquisa.

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

Com base em Tasca *et al.*, (2010), Afonso *et al.*, (2011), Ensslin e Ensslin (2011), Lacerda *et al.*, (2012); Volpato (2013), o enquadramento metodológico desta pesquisa é apresentado sob cinco enfoques: natureza do objetivo; natureza da pesquisa; processo da pesquisa; resultados da pesquisa; e métodos (ferramentas) a serem usados na pesquisa (Figura 14).

Figura 14 - Enquadramento metodológico da pesquisa.



Fonte: Elaborada pela autora, com base em Tasca *et al.*, (2010); Afonso *et al.*, (2011); Ensslin e Ensslin (2011) e Lacerda *et al.*, (2012).

Quanto à natureza do objetivo, esta pesquisa caracteriza-se como exploratória e, com relação à natureza da pesquisa, é classificada como descritiva. Segundo Kassai (2002); Afonso *et al.*, (2011), a pesquisa exploratória objetiva conhecer as variáveis de estudo para obter maiores informações sobre determinado assunto; trata-se de aprofundar conceitos preliminares, muitas vezes inéditos, com a finalidade de formular problemas e hipóteses para estudos posteriores. Hoppen *et al.*, (1996) citam que a pesquisa exploratória permite levantar características inéditas e novas dimensões a respeito da população-alvo, com o propósito de definir novos conceitos a estudar, indicando a melhor maneira de medi-los.

Em relação à pesquisa descritiva, Gil (2007) afirma que esta objetiva descrever os procedimentos utilizados, os resultados obtidos, as características de determinada população e o estabelecimento das relações entre as variáveis, bem como a natureza destas. Por sua vez, Hoppen *et al.*, (1996) mencionam que a pesquisa descritiva tem por finalidade informar ao pesquisador a respeito de situações, fatos, opiniões ou comportamentos da população analisada. Estes autores reforçam que o objetivo da descrição do objeto analisado é mapear a distribuição de um fenômeno na população estudada, seja ela tomada como um todo, seja dividida em subgrupos. No processo de pesquisa, são descritas as características dos dados primários e secundários. Quanto à abordagem do problema, este estudo trata-se de uma pesquisa qualitativa e quantitativa (quali-quant).

A região de estudo e as propriedades foram escolhidas pela disponibilidade e acessibilidade às informações necessárias ao estudo, disponibilizadas pelo SEBRAE-Educampo Cana e pela Destilaria Serra dos Aimorés – DASA. Num primeiro momento, os dados qualitativos e quantitativos foram obtidos em fontes secundárias, pois, além da revisão de literatura, a base de dados foi obtida no SEBRAE/MG-Educampo Cana e na Destilaria Serra dos Aimorés (DASA). Posteriormente, obtiveram-se dados primários, por meio da aplicação de questionários (APÊNDICE B) e de visitas técnicas *in loco* para complementar ou validar os resultados da pesquisa. Ressalta-se que os dados secundários foram apresentados em valores totais; portanto, por meio de entrevistas e visitas técnicas foi possível detalhar cada variável para se obterem os indicadores técnicos. Após, foram utilizadas ferramentas estatísticas para tratamento, análise e interpretação dos dados.

Quanto ao problema de pesquisa, segundo Godoy (1995); Hoppen *et al.*, (1996); Cauchick Miguel (2010), nas ciências sociais,

para qualquer estudo em desenvolvimento, há fundamentalmente duas abordagens: pesquisa qualitativa e pesquisa quantitativa. Godoy (1995) destaca que a pesquisa quantitativa é aquela que se preocupa com a medição objetiva e a quantificação dos resultados, isto é, mede com precisão as variáveis expressas através de números. Caso, por limitação de recursos, não seja possível realizar as medidas diretamente em populações, procura-se realizá-las por meio de inferência estatística, e, com o apoio de *softwares* específicos, comprova-se a validade da hipótese.

Ao ilustrar a estrutura lógica da abordagem quantitativa, Cauchick Miguel (2010) reforça que a pesquisa começa com um problema e, a partir da teoria, são deduzidas hipóteses que são as prováveis soluções. Essas hipóteses serão testadas e, para tanto, é necessário operacionalizar os conceitos nelas contidos em variáveis mensuráveis. Contudo, reforça este autor, quando existe necessidade de explicar os resultados de uma pesquisa quantitativa, ou seja, de entender o contexto do fenômeno e explicar as razões de tais comportamentos ou padrões, a combinação das abordagens quantitativa e qualitativa pode proporcionar uma visão mais ampla e completa do estudo. Dessa forma, esse uso combinado de abordagens quantitativa associada à qualitativa pode evitar a divisão dos pesquisadores em dois blocos que não colaboram entre si.

A pesquisa qualitativa é aquela que não utiliza instrumental estatístico na análise dos dados e nem procura enumerar e, ou, medir os eventos estudados, portanto, é feita por meio da análise de tabelas e gráficos. A principal característica dessa metodologia é o ambiente natural como fonte direta, sendo o pesquisador instrumento fundamental (GODOY, 1995). Segundo Hoppen *et al.*, (1996, p. 20), a metodologia qualitativa é constituída por um conjunto de técnicas interpretativas que têm por meta decodificar ou traduzir fenômenos sociais naturais, com vistas à obtenção de elementos relevantes para descrever ou explicar estes fenômenos. Com base na descrição destes autores, quanto à abordagem do problema, esta pesquisa classifica-se, basicamente, como quantitativa, uma vez que a coleta, tratamento e análise dos dados foram guiados pelo uso de métodos estatísticos (média, desvio-padrão, análises de correlação e regressão) e pelas abordagens Análise Envoltória de Dados e Índice de Produtividade de *Malmquist*. Entretanto, nesta pesquisa, de forma complementar, também foram incluídas abordagens qualitativas, uma vez que realizaram-se visitas técnicas *in loco*, e por meio de entrevistas e questionários pode-se, através de observações e

coleta de dados, complementar e confirmar os resultados.

Em relação aos resultados, esta pesquisa classifica-se como aplicada, pois, segundo Afonso *et al.*, (2011), neste tipo de pesquisa são coletados dados com base em um procedimento estruturado, que, posteriormente, são analisados seguindo-se também uma metodologia estruturada.

Neste estudo, o modelo de produção usado para avaliar a eficiência relativa das propriedades canavieiras foi a Análise Envoltória de Dados, por meio dos modelos envoltórios com retornos constantes (CCR ou RCE) e variáveis de escala (BCC ou RVE) e, com o objetivo de medir a variação da produtividade em períodos distintos de tempo, utilizou-se o Índice de *Malmquist*, ambos os modelos com orientação à redução de insumos (*inputs*) para projeção na fronteira de eficiência. Com fundamentação em Malmquist (1953); Charnes *et al.*, (1978); Banker *et al.*, (1984) e Lovell (1996), neste estudo, o índice de *Malmquist* foi calculado pelo índice modificado por Ray e Desli (1997), que definem o Índice de *Malmquist* na presença de retornos variáveis à escala. Para confrontar os diferentes períodos de tempo, adotou-se o critério de comparar as quatro rebrotas da cana, uma vez que os tipos de insumo usados na cana-planta divergiam dos das rebrotas. Dessa forma, para obter a variação do desempenho técnico e tecnológico em períodos distintos de tempo, foram comparados os anos atuais com os anos anteriores (denominados “t” e “t-1”).

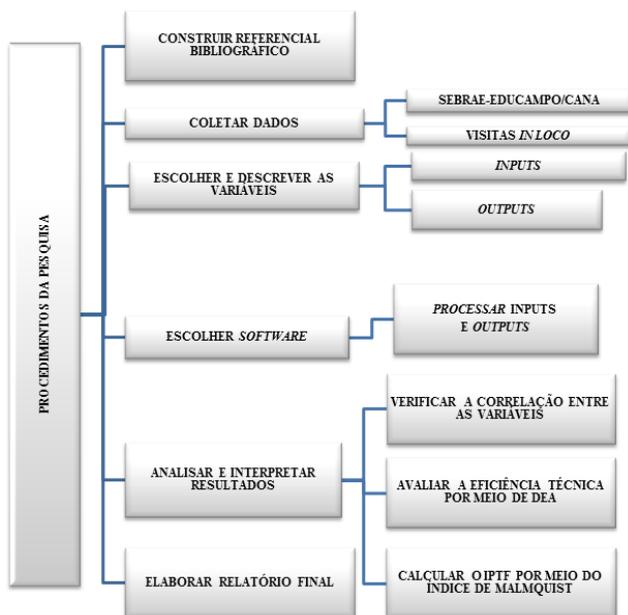
3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

Na Figura 15, estão descritos os procedimentos para a realização desta pesquisa. Estes procedimentos abrangem resumidamente as seguintes etapas: *i*) Coleta de dados; *ii*) Escolha do ferramental para trabalhar os dados; *iii*) Escolha das variáveis; *iv*) Escolha do software DEA e *Malmquist*; *v*) Análise e interpretação dos resultados; e *vi*) Considerações finais da pesquisa.

Conforme Furasté (2008, p. 27), “o tipo de material a ser procurado vai depender da natureza do problema levantado e do enfoque que se deseja dar ao tema devidamente delimitado”. Assim, para atender ao objetivo proposto que vai ao encontro da solução do problema levantado, foi desenvolvida pesquisa bibliográfica nas bases científicas de dados Scielo, Web of Science, Scopus e ScienceDirect, bem como consultas diretas a livros, teses, dissertações, periódicos e anais de

congressos (nacionais e internacionais). E, para armazenamento desses dados, utilizou-se o programa gerenciador de referências “EndNote X5”. Em uma primeira fase, foram feitas as buscas por meio das palavras-chave do agronegócio e do setor sucroenergético e, posteriormente, sobre as abordagens DEA e Índice de *Malmquist*.

Figura 15 - Procedimentos para a realização da pesquisa.



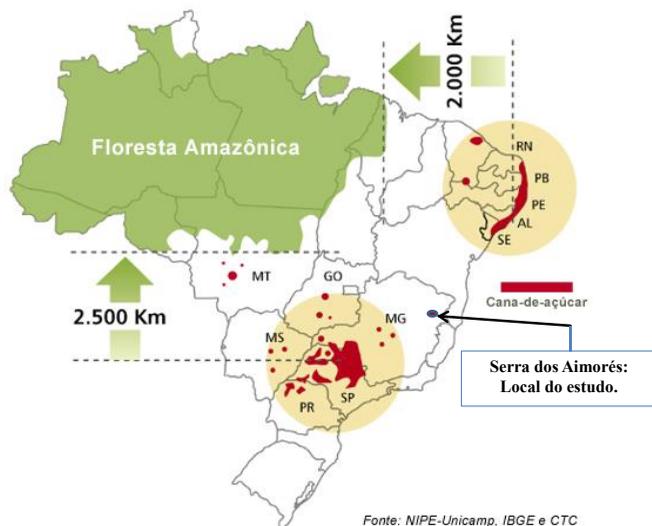
Fonte: Elaborada pela autora.

Os dados correspondentes a este estudo foram obtidos de diversas fontes, destacando-se, além de fontes bibliográficas, as planilhas do SEBRAE/MG-Educampo Cana; da Destilaria Serra dos Aimorés, de resultados de entrevistas estruturadas ou não estruturadas. Assim, esse estudo foi realizado juntamente aos produtores de cana-de-açúcar da Destilaria Serra dos Aimorés (DASA), em Aimorés, Região Nordeste do estado de Minas Gerais. Os dados obtidos no SEBRAE/MG-Educampo Cana corresponderam ao período de 2006 a 2011 (cinco safras de cana), corrigidos pela inflação (IGP-DI julho de 2011). Esses dados foram coletados por meio de formulários de campo, por uma equipe técnica da DASA que orienta os produtores de cana-de-açúcar desde a implantação dos canaviais até a colheita e transporte dos colmos para a

industrialização. Após a coleta, esses dados foram encaminhados para uma central de processamento e inseridos em um programa computacional desenvolvido especificamente para armazenar os dados técnicos das propriedades fornecedores de cana dessa destilaria.

A escolha da região justifica-se em razão de esta ser uma das regiões canavieiras do Brasil que tem a maior produtividade agrícola sem irrigação. Esta grande produtividade possivelmente seja em decorrência da temperatura e radiação solar, uma vez que quando há boa distribuição de chuvas várias fazendas têm produtividade de colmos superiores a 150 t por ha, considerada alta por autores como Demattê (2005), Rapassi (2009); Oliveira *et al.*, (2012). Na Figura 16 consta a localização geográfica das propriedades avaliadas.

Figura 16 - Mapa do Brasil destacando-se a localização geográfica das propriedades avaliadas no estudo.



Quanto ao procedimento de análise dos dados, para desenvolver este estudo, utilizaram-se estatística descritiva, Análise Envoltória de Dados, Índice de Produtividade de *Malmquist* e Análise de Regressão. Assim, para obtenção dos resultados, o instrumental empregado foi composto de: planilhas do *Excel* e dos *softwares* *Stata* e *Excel* para análise estatística descritiva e indutiva dos dados. Na aplicação da

abordagem DEA, foram usados os *softwares* GAMS (*General Algebraic Modeling System*) e EMS (*Efficiency Measurement System*) e, para o Índice de Produtividade de *Malmquist*, usou-se o programa *Konsi Malmquist Index Software*.

Em uma análise por meio da abordagem DEA, devem-se cumprir três etapas: Definir e selecionar as unidades tomadoras de decisão (DMUs); selecionar as variáveis de *input* e *output*; e escolher e aplicar o modelo.

Na etapa de seleção das DMUs, inicialmente, pretendia-se analisar todas as 106 fazendas conveniadas com o SEBRAE/Educampo-Cana, na região. Porém, a amostra foi reduzida a 79 fazendas, por considerar que nas demais não havia similaridade entre variedades de cana, safras e número de talhões, além de haver variáveis com ausência de alguma informação para um ou mais ciclos analisados (2006-2011). Assim, os dados desse estudo originaram-se de cinco canaviais ou talhões de cada fazenda (a partir de então denominados DMU), cinco safras (cana-planta à quarta rebrota correspondentes às safras 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010 e 2010-2011) e cinco variedades de cana (RB835486; RB855113; RB855536; RB867515 e SP79-1011), de 79 fazendas, totalizando 1.975 observações. Há de se destacar que as propriedades canavicultoras escolhidas possuem características semelhantes, ou seja, consistência de informações durante o período analisado, o que é pertinente ao método utilizado (DEA), pois, cada DMU terá os seus gastos com insumos (*inputs*) e resultados (*outputs*) comparados com os gastos e resultados das outras DMUs da amostra.

Quanto à seleção das variáveis de *input* e *output*, a escolha adequada dessas variáveis para compor o modelo DEA é um dos passos mais importantes na metodologia de avaliação da eficiência das organizações. Conforme Quadro 1, Capítulo 2, as variáveis necessárias para implantação e condução de um canavial são: área, calcário, adubo químico, adubo orgânico, muda de cana, inseticida, herbicida, mecanização (na implantação e condução do canavial) e recursos humanos (na implantação e condução do canavial e no corte, carregamento e transporte da cana à indústria).

A seguir, citam-se as características das 79 fazendas produtoras de cana que fizeram parte deste estudo:

- a) Área com plantação de cana: a área média foi 135,13 ha (menor 26,69 ha e maior 734,33 ha);
- b) Área dos talhões (canaviais): a área média dos talhões foi 5,87

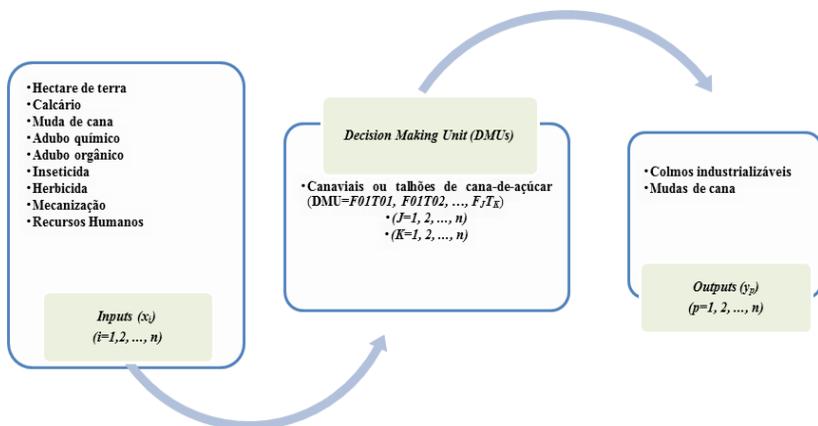
- ha (menor 1,42 ha e maior 18,70 ha);
- c) Coleta de solo para análise: antes da aplicação do corretivo de acidez do solo e dos fertilizantes, foram feitas análises químicas do solo. Normalmente, faz-se, em média, uma amostra composta por 10 ha. Essa amostra composta é formada por cerca de 10 amostras simples;
 - d) Correção de acidez do solo, com base no resultado da análise química do terreno: quando da implantação ou da reforma do canavial (cana-planta), foram aplicadas 2 a 5 toneladas de calcário por ha;
 - e) Adubo químico da cana-planta: aplica-se quando da implantação do canavial e recomendaram-se de 500 a 700 kg/ha do formulado 00-20-20 (significa zero % de N; 20% de P_2O_5 e 20% de K_2O). Este tipo de adubo químico é usado somente na cana-planta;
 - f) Muda de cana: existem viveiros (canaviais) somente para a produção de mudas; porém, neste estudo, apenas três propriedades produziram as mudas de cana, as demais compraram as mudas para a implantação dos canaviais. A quantidade de muda (t/ha) oscila conforme a variedade da cana, qualidade da muda, dentre outros. Recomendou-se plantar de 12 a 15 t/ha;
 - g) Adubo químico nas rebrotas: aplicou-se em cada ciclo a partir da primeira rebrota e, recomendaram-se 250 a 500 kg/ha do formulado 20-00-20 (significa 20 de N; zero de P_2O_5 e 20 de K_2O);
 - h) Adubo orgânico nas rebrotas: este adubo orgânico (resíduo da destilação do álcool) é aplicado em canavial recém-colhido: recicla nutrientes, aduba e irriga a cana. Este substitui o adubo químico das rebrotas (nas propriedades estudadas), ou seja, quando há aplicação de vinhaça não há aplicação do adubo químico (item g). A aplicação oscilou de 20 a 50 m^3 por hectare. Aplicou-se em cada rebrota da cana;
 - i) Herbicida cana-planta: aplicou-se o “Advance” (2 a 3,5 kg ou l) para combater as plantas daninhas na cana-planta e nas rebrotas. E aplicou-se o “Glifosato” para matar a rebrota da cana para a reforma do canavial, ou seja, quando da implantação de um novo canavial. Não teve rateio. Recomendou-se aplicar de 2 a 3,5 kg do Advance (usado por todas as propriedades);

- j) Herbicida nas rebrotas: para controle de plantas daninhas (repassa com o herbicida “Sencor”, seletivo à cana-de-açúcar). Devido à extensão da área de cultivo, os produtores têm utilizado o método químico para o controle de plantas daninhas, empregando-se herbicidas de diversas classes e princípios ativos, visando otimizar o uso de pulverizadores e aumentar a eficácia do controle químico das plantas daninhas.
- k) Inseticida cana-planta: aplicou-se a quantidade fixa (250 gramas) do produto Regente 800 WG sobre os toletes da cana, antes do recobrimento das mudas com o solo;
- l) Inseticida (controle de formigas): houve necessidade de aplicação, somente, a partir da segunda rebrota, pois na cana-planta e na primeira rebrota foi aplicado o inseticida Regente, que tem efeito residual;
- m) Inseticida biológico: usado no controle de pragas. Na DASA há um laboratório para multiplicação de parasitas das pragas usado no controle de pragas. São inimigos naturais da broca-da-cana, denominados *Coetesia flavipes* (vespinha ou cotésia), produzidos em laboratórios e liberados aos milhares em locais estratégicos dentro do canavial, para parasitar e matar a larva da broca-da-cana. Os copinhos com cotésias são subsidiados aos fornecedores de cana, pela destilaria e liberados, em média, três copinhos com cerca de 1.500 unidades cada, por ha de cana. Assim, aplicou-se o inseticida biológico, em três a quatro pontos/ha, aproximadamente a uma distância de 50 metros entre eles;
- n) Mecanização: na cana-planta foram gastas, em média, 8,5 horas máquina (h.m) por hectare, na distribuição do calcário, gradagens pesada e de nivelamento, subsolagem, sulcagem e adubação química, aplicação de inseticida, cobrição das mudas e aplicação de herbicida. Porém, nas rebrotas foram gastas 9,5 horas com adubação e reaplicação de herbicida;
- o) Recursos humanos: as horas de recursos humanos foram divididas em três etapas: na condução do canavial, no corte e carregamento da cana e no transporte da cana (do canavial até à destilaria). Na condução do canavial foram consumidas, em média, 108 horas homem (h.H), por hectare, considerando as horas de coleta de amostra de solo; arremesso das mudas, distribuição e picagem das mudas, transporte das mudas, aplicação de calcário, preparo do solo, aplicação de herbicida e

inseticida (químico e biológico), gerenciamento (recursos humanos familiar) e consultoria dos técnicos do Educampocana. No corte e carregamento da cana foram consumidas, em média, 122 h.H por hectare de cana. No transporte da cana, as h.m, por hectare de cana cortada, variaram de acordo com a quilometragem percorrida pelo caminhão e a capacidade de carga do veículo transportador. A distância do canavial à plataforma de industrialização da cana, em média, foi de 23 km (mínimo 5 km e máximo 56 km). A velocidade média de um caminhão com reboque, designado no setor sucroalcooleiro de “Romeu e Julieta”, é de 15 km por hora, com capacidade de carga de 25 t de cana.

Assim, para analisar o conjunto de variáveis em um sistema de produção de cana da Serra dos Aimorés, elaborou-se um modelo conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Modelo de processo de produção das fazendas produtoras de cana-de-açúcar da Serra dos Aimorés.



Fonte: Elaborada pela autora.

Nesta figura apresenta-se o modelo empírico do sistema de produção de cana, no qual é mostrado um conjunto “ i ” de *inputs* para obter “ p ” produtos, onde “ F ” são as fazendas canavicultoras e “ T ” os talhões de cana-de-açúcar. Os *inputs* são representados por nove insumos básicos que participam diretamente do processo produtivo da cultura canavieira, enquanto as DMUs representam os canaviais ou

talhões de cana, nos quais ocorre o processo de transformação dos insumos em produtos finais (produção de colmos industrializáveis e mudas de cana).

A partir desse conjunto de variáveis, o primeiro passo foi selecionar previamente as variáveis a serem utilizadas no estudo. Assim, foram excluídas as fortemente correlacionadas (APÊNDICE C) e, na sequência, reduzida adicionalmente a dimensionalidade do processo por meio de análise de componentes principais ou PCA (principal component analysis) das variáveis de *input* e *output* referentes à cana-planta e rebrotas da cana (APÊNDICE D). O segundo passo foi atender à exigência da abordagem DEA, em que, o número de DMUs seja no mínimo quatro a cinco vezes maior que o número de variáveis (insumos + produtos). Os gráficos da análise de correlação das variáveis podem ser observados no APÊNDICE D.

Com base na análise de correlação (APÊNDICE C), as variáveis “adubo químico da cana-planta e mudas de cana” foram desconsideradas da análise, uma vez que estas apresentaram grande correlação com a área do canavial (talhão). O insumo “inseticida biológico” foi removido da análise porque não apresentou variação, ou seja, todas as áreas plantadas receberam a mesma quantidade por hectare, fazendo com que não exista a possibilidade de avaliar qualquer efeito dessa variável sobre a produção de cana. Da mesma forma, as variáveis relativas à “mecanização e aos recursos humanos” (na condução do canavial), também foram retiradas, porque têm relação ou são diretamente influenciadas pela produção de cana. Estas, não são variáveis que explicam a produção e sim variáveis explicadas pela produção. Entretanto, a variável “inseticida químico”, aplicado na cana-planta, embora tivesse alta correlação com outras variáveis, foi mantida em virtude do interesse em avaliar a variação ao longo das rebrotas. Por fim, não foi considerada, na análise, a variável “horas de recursos humanos” relativas ao corte, carregamento e transporte da cana (CCT), uma vez que estas operações encontram-se após o final do processo de produção.

Em razão de as fazendas terem tipos diferentes de adubo aplicados nas rebrotas da cana, estas foram divididas em dois grupos: O Grupo 1, composto por 20 fazendas que aplicaram adubo orgânico (vinhaça) nas rebrotas e o Grupo 2, formado por 59 fazendas que aplicaram adubo químico (formulado 20-00-20) nas rebrotas.

Quanto aos *outputs* “produção de colmos industrializáveis” e “produção de mudas de cana”, considerou-se somente a variável “produção de colmos industrializáveis”, uma vez que apenas três

fazendas produziam mudas de cana para o plantio do canavial. Assim, a receita referente à venda de mudas de cana não foi incluída na receita bruta das fazendas deste estudo.

Após a seleção, as variáveis capazes de caracterizar adequadamente o processo de transformação da cultura canaveira são:

Grupo 1: Fazendas com aplicação de adubo orgânico (vinhaça)

a) Variáveis de entrada (Inputs)

- Área do canavial: hectares de cana plantada em cada talhão (canavial);
- Calcário: quantidade (tonelada/talhão) aplicada para corrigir a acidez do solo;
- Adubo orgânico das rebrotas: quantidade (metros cúbicos por talhão) aplicada para fertilizar o solo;
- Herbicida: quantidade (quilograma/talhão) aplicada para combater plantas daninhas;
- Inseticida químico: quantidade (quilograma/talhão) aplicada para combater pragas.

b) Variáveis de saída (Output)

- Produção (toneladas/talhão) de colmos industrializáveis de cana-de-açúcar.

Grupo 2: Fazendas com aplicação de adubo químico nas rebrotas (sem vinhaça)

a) Variáveis de entrada (Inputs)

- Área do canavial: hectares de cana plantada em cada talhão (canavial);
- Calcário: quantidade (tonelada/talhão) aplicada para corrigir a acidez do solo;
- Adubo químico das rebrotas: quantidade (tonelada/talhão) aplicada para fertilizar o solo;
- Herbicida: quantidade (quilograma/talhão) aplicada para combater plantas daninhas;
- Inseticida químico: quantidade (quilograma/talhão) aplicada para combater pragas.

b) Variáveis de saída (Output)

- Produção (toneladas/talhão) de colmos industrializáveis de cana-de-açúcar.

Considerando que alguns insumos foram aplicados apenas em determinado ciclo de produção, porém com influência nos demais ciclos, fez-se a distribuição (rateio) desses insumos, conforme mostrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Distribuição dos insumos usados no processo de produção (rateio dos itens).

Insumo	Aplicação	Distribuição (rateio) dos <i>inputs</i>
Calcário	Cana-planta	Linear para os cinco ciclos
Adubo químico (formulado 20-00-20)	Rebrotas	Não houve distribuição (rateio) entre os ciclos. Aplicou-se em cada rebrota
Adubo orgânico (vinhaça)	Rebrotas	Não houve distribuição (rateio) entre os ciclos. Aplicou-se em cada rebrota
Inseticida	Cana-planta	Rateio para dois ciclos (cana-planta e primeira rebrota)
Inseticida (controle de formigas)	Segunda à quarta rebrotas	Não houve distribuição (rateio) entre os ciclos. Aplicou-se o insumo a partir da segunda rebrota
Herbicida	Cana-planta	Não houve distribuição (rateio) entre os ciclos.

Para avaliar a eficiência relativa das fazendas, utilizou-se o método DEA, modelos (envoltório) RCE e RVE, com orientação a insumos. A escolha dessa orientação deveu-se à importância de avaliar a eficiência desses insumos em um sistema de implantação e condução de um canavial, pois, conforme Fernandes (2000); Vitti e Mazza (2002); Macedo *et al.*, (2004); Demattê (2005); Burnquist (2011) e Oliveira *et al.*, (2011), o uso de técnicas e práticas culturais eficientes, desde o planejamento até a implantação de um canavial, assim como a otimização do uso dos insumos, da terra e dos recursos humanos poderá elevar o índice de produtividade total da cultura, com consequentes redução de custos e aumento da rentabilidade, além de contribuir para a preservação ambiental na medida em que os insumos forem usados da melhor forma possível. Ademais, esta opção pela orientação-insumo deveu-se à possibilidade de intervenção dos agricultores na tentativa de reduzir os custos de produção ser uma possibilidade considerada maior que sua capacidade de influenciar o preço de venda de seus produtos no mercado sucroenergético. Com base nessa escolha, tem-se que os resultados gerados contribuirão para identificar a eficiência na relação insumo-produto.

Por meio dos modelos DEA/RCE e DEA/RVE, foram avaliadas as eficiências técnica e de escala de produção dos Grupos 1 e 2, para períodos individuais de tempo. Contudo, nos estudos de competitividade, considera-se importante avaliar as variações da eficiência produtiva ao longo do tempo. Assim, como complementação, utilizou-se a abordagem *Malmquist*, uma vez que essa ferramenta permite decompor as variações na produtividade total dos fatores em variações na eficiência técnica e tecnológica entre dois períodos de tempo.

4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO DA SERRA DOS AIMORÉS

Conforme descrito anteriormente, o sistema de produção de cana-de-açúcar da Região das Serras dos Aimorés abrange uma área de cana contígua superior a 100 mil hectares. O mapeamento da área produtiva, a divisão das fazendas em seções e, posteriormente, em talhões, são realizados de forma rápida e eficiente com o uso de técnicas de geoprocessamento (GPS), conforme constatado quando das visitas técnicas às fazendas. Definidos os talhões de cana, alocam-se as estradas e os carregadores destinados ao trânsito de máquinas, equipamentos, insumos e transporte dos colmos industrializáveis para a destilaria. Nessa região, no período de 2006-2011, existiam 106 fazendas assistidas pelo SEBRAE/Educampo-Cana – um convênio com a Destilaria Serra dos Aimorés (DASA) – empresa que industrializa toda a produção de cana da região.

Por ocasião deste estudo, na região, a colheita da cana era manual e com despalha a fogo (ou com queima), na maioria das fazendas, e a quase totalidade do plantio é de “cana de ano e meio”, iniciando-se geralmente nas primeiras semanas de março e estendendo-se até abril, dependendo da ocorrência de chuvas ou da umidade no solo.

A escolha do plantio de “cana de ano e meio” – também realizado em maior percentual nas outras regiões brasileiras –, deve-se, principalmente, à época de menor ocorrência de chuvas (facilitando o deslocamento dos caminhões e máquinas e com menor interrupção das atividades); à menor erosão do solo após o preparo e menos assoreamento dos sulcos de plantio nas áreas com declividade; à produtividade no primeiro corte ser maior comparativamente à “cana de ano”; e, ao melhor gerenciamento de tratores, caminhões, carregadeiras e dos recursos humanos, pois nessa época não há colheita de cana. Dessa forma, as atividades dos trabalhadores concentram-se no corte das mudas e plantio (ANDRADE; ANDRADE, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007; RIPOLI *et al.*, 2007).

Os ambientes de produção da cana (descritos no item 2.1.6, página 47) são definidos com base nos atributos químicos e físicos da camada superficial do solo. Ademais, consideram-se a precipitação

pluvial, as temperaturas máximas, mínimas e médias, a radiação solar e a evapotranspiração (PINAZZA *et al.*, 1986; PRADO, 2005; ANDRADE; ANDRADE, 2007; MACHADO *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007; RIPOLI *et al.*, 2007). Assim, com base nesses autores, no Quadro 4, estão apresentados os ambientes de produção e as épocas de colheita recomendados para algumas variedades de cana mais cultivadas na região da Serra dos Aimorés.

Quadro 4 - Alocação das variedades de cana em função do ambiente de produção e época de colheita recomendada para as principais variedades de cana cultivadas na região da Serra dos Aimorés, MG.

Variedade	Ambiente de produção								Época de colheita									
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
RB72454																		
RB835486																		
RB855035																		
RB855036																		
RB855113																		
RB855156																		
RB855453																		
RB855536																		
RB867515																		
SP791011																		
SP801816																		
SP801842																		
SP803280																		
SP813250																		

Fonte: Adaptado de Ideas News (2004); Prado (2005); Ripoli *et al.*, (2007); Silveira *et al.*, (2007); Landell e Bressiani (2010).

Todas as variedades plantadas nessa região de estudo são indicadas para o cultivo nos ambientes B1 e B2, enquanto para os ambientes A1 e A2 recomendam-se oito variedades de cana. Em relação aos ambientes D1 e D2 sugere-se plantar apenas as variedades RB72454, RB855035 e RB867515. As variedades que alcançam a maturação mais precocemente são a RB855156 e a RB855453, indicadas para o início da moagem, em abril. No mês de maio, além dessas duas variedades, podem-se colher e industrializar a RB835486 e a RB855536. A partir de junho aumenta o número de variedades aptas à colheita e, para o final da safra, recomendam-se as variedades RB72454, RB867515 e SP803280.

Para as variedades recém-lançadas ou introduzidas recentemente

na região, desenvolvem-se estudos locais para avaliar a adaptação e o potencial produtivo, que são grandemente influenciados, dentre outros fatores, pelo volume e distribuição das chuvas, radiação solar, disponibilidade de nutrientes no solo, época de colheita e manejo das rebrotas. Este é um procedimento clássico, adotado em todas as regiões canavieiras do Brasil, conforme citado por Pinazza *et al.*, (1986); Silveira *et al.*, (2007); Oliveira *et al.*, (2007); Raji (2011). Na região da Serra dos Aimorés está sendo implementada a agricultura de precisão e, na coleta das amostras de solos, são utilizados pequenos veículos motorizados, equipamentos com sonda e GPS, o que aumenta muito o rendimento da coleta e detalha mais as variações de fertilidade que ocorrerem dentro do talhão de cana.

Normalmente, a safra acontece nos meses de menor precipitação pluvial, quando a concentração de açúcares no caldo aumenta. Na DASA, a extração do caldo da cana é realizada por dispositivos chamados de moendas. A cana é prensada entre grandes cilindros e, no final do processo de produção, têm-se o produto “caldo” e o resíduo “bagaço” da cana. O teor de açúcares no caldo varia de acordo com a variedade de cana, tipo de solo, época de colheita, adubação e condições climáticas, principalmente temperatura, radiação solar e disponibilidade de água no solo. Nesse caldo concentrado têm-se açúcar e mel (o açúcar solidifica e o mel não solidifica). Essa solução concentrada (de açúcar e de mel) é submetida à uma centrifugação automatizada, ou seja, o grânulo de açúcar é lavado com jatos de vapor d’água para diminuir a viscosidade do mel em sua separação dos cristais de açúcar. A seguir o açúcar é seco, embalado ou transportado para um silo (juntado por uma pá carregadeira).

O produto mel, derivado desse processo, é bombeado para a dorna de fermentação (reservatório com 5 m de diâmetro por 7 m de altura), onde será diluído com água e, posteriormente, receberá as leveduras (microrganismos que fazem a fermentação, transformando o açúcar em álcool). Para evitar crescimento bacteriano ou de fungos, adiciona-se ácido sulfúrico e antibiótico ao mel diluído. O setor sucroalcooleiro adotou uma medida para quantificar a massa de açúcares nos colmos, subtraídas as perdas dos processos industriais: designaram de Total de Açúcares Recuperáveis (ATR) a quantidade de açúcar que pode ser extraída e recuperada, originando açúcar ou álcool, os dois principais produtos da cana. Pode-se considerar um valor médio de 140 kg de ATR por tonelada de colmos, durante toda a safra. Porém, quando a cana está bem madura esse valor pode ultrapassar 150 kg/t de colmos.

Após a fermentação e destilação do caldo são obtidos em média de 80 a 90 L de álcool por tonelada de colmos. Após a destilação do caldo fermentado há produção de 10 a 14 litros de vinhaça para cada litro de álcool.

A cana industrializada na DASA é destinada exclusivamente à produção de álcool. Assim, a vinhaça (principal resíduo da fabricação do álcool), rica em matéria orgânica e em elementos minerais, principalmente potássio e cálcio, é reutilizada na fertirrigação da própria lavoura de cana. Nessa região, à semelhança da grande maioria das indústrias sucroenergéticas brasileiras, a vinhaça é empregada *in natura* na lavoura da própria cana-de-açúcar, substituindo parcial ou totalmente os fertilizantes químicos. Esta prática, denominada fertirrigação, além de adubar a cana, fornece água para a cultura rebrotar com mais vigor, visto que a colheita ocorre em meses de baixa precipitação pluvial. A dose empregada de vinhaça varia de acordo com os teores de potássio nessa vinhaça e no solo, evitando-se a contaminação do lençol freático. De modo geral, a aplicação de vinhaça oscila entre 30 e 50 m³ por hectare.

Conforme Fernandes (2000); Vitti e Mazza (2002); Macedo *et al.*, (2004); Demattê (2005); Oliveira (2007); Burnquist (2011) e Oliveira *et al.*, (2011), os principais itens de um sistema de produção de cana-de-açúcar são: área disponível, calcário, gesso, adubo, muda de cana, inseticida, herbicida e os serviços de mecanização e de recursos humanos na implantação e condução dos canaviais, incluindo o corte, carregamento e transporte da cana até à plataforma da indústria sucroenergética.

Os produtores de cana-de-açúcar da região da Serra dos Aimorés utilizam todas essas tecnologias, havendo, entretanto diferenças entre fazendas quanto à área do talhão, a dose de insumos empregados e associação entre esses insumos. Assim, as principais tecnologias adotadas pelos canavicultores da região da Serra dos Aimorés são: planejamento da lavoura; análise química do solo para definir a necessidade de aplicação de corretivos de acidez e das doses de fertilizantes químicos; escolha de variedades mais adaptadas a determinado ambiente de produção; controle químico de plantas daninhas; controle biológico de pragas; avaliação da maturação das lavouras antecedendo ao corte da cana e escalonamento da colheita; uso de resíduos orgânicos na adubação da rebrotas, especialmente daqueles originários da industrialização da própria cana, como a vinhaça (resíduo da destilação do álcool), da cinza das caldeiras e do bagaço da cana

(OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Em algumas fazendas, o emprego da vinhaça é maior e mais frequente. Geralmente, onde se usa maior dose de vinhaça para adubar a cana-de-açúcar, empregam-se menores doses de adubo ou não se utiliza o fertilizante químico nas rebrotas como é o caso deste estudo. Uma das variáveis que mais influencia no uso da vinhaça é a distância da fazenda até a destilaria, ou dos dutos usados para canalizar a vinhaça para o campo.

Nas áreas de produção de cana, avalia-se a maturação de cada talhão de cana antes da colheita. Segundo Pinazza *et al.*, (1986); Machado *et al.*, (2007); Oliveira *et al.*, (2007); Almeida *et al.*, (2008); Silva (2011), este é um procedimento-padrão adotado em outras regiões canavieiras do Brasil. Devido à maior dimensão das lavouras, pequenos acréscimos no teor de açúcar no caldo da cana têm grande significado econômico. Dessa forma, é usual coletarem-se amostras de colmos industrializáveis para determinar analiticamente, em laboratório, os teores de açúcar no caldo.

O início do processo de industrialização da cana colhida mecanicamente é mais rápido que o da colheita manual, uma vez que os veículos utilizados para receber os colmos colhidos pelas colhedoras, quando cheios, são descarregados em caminhões, sendo a carga de colmos imediatamente transportada para a destilaria ou usina, para moagem e industrialização do caldo. A colheita da cana nessa região do estudo, até 2011, era realizada totalmente com corte manual; entretanto, está havendo uma mudança muito rápida para o sistema de colheita mecanizada em quase todas as propriedades.

Na região da Serra dos Aimorés (17° 50' 54" S e 40° 10' 30" W), a radiação solar e a temperatura são propícias ao crescimento e à maturação da cana. Entretanto, o volume e a distribuição das chuvas têm sido a variável climática que mais interfere na produtividade dos canaviais. Na Tabela 3, estão apresentados os valores de precipitação pluvial do período de janeiro de 2005 a dezembro de 2011, fornecidos pelo Departamento Técnico da Destilaria Serra dos Aimorés.

O plantio da cana de ano e meio ocorre normalmente nos meses de março e abril e, a colheita, dependendo das chuvas, tem início em abril e se estende até novembro. Pela Tabela 3, pode-se constatar que a precipitação pluvial é bastante irregular, tanto com relação ao volume anual quanto ao mensal. No ano de 2007 foi observada a menor precipitação anual: 864 mm, cerca de 1.000 mm menor que 2005 (o ano mais chuvoso). Quanto à precipitação mensal e, considerando-se os

meses de maior evapotranspiração (outubro a março), verifica-se também grande variação quanto ao volume de chuva, sendo janeiro de 2010 o mais seco, com apenas 7,0 mm.

Tabela 3 - Precipitação pluvial mensal do período de janeiro de 2006 a julho de 2011, na microrregião da Serra dos Aimorés, MG.

Ciclo	Ano -----2006-----2007-----2008-----2009-----2010-----2011-----												Total chuva								
Plantio/Colheita	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	mm	
Cana-planta	2006	35,5	29,5	338,0	117,0	13,5	59,0	56,5	8,5	72,0	164,5	364,5	285,0	68,0	211,0	38,0	243,5	17,0	9,0	16,5	2.146,5
1ª rebrota	2007	33,0	38,0	8,5	61,0	121,0	169,5	119,5	111,0	82,0	16,5	22,5	26,0							808,5	
2ª rebrota	2008	37,0	24,0	21,0	339,0	173,0	317,5	53,5	139,5	193,5	18,5	35,5	18,0							1.370,0	
3ª rebrota	2009	53,0	35,5	274,0	145,5	98,0	7,0	64,5	391,5	179,5	8,0	25,0	73,5							1.355,0	
4ª rebrota	2010	2,5	43,0	53,5	330,0	147,5	21,5	91,0	196,5	283,5	39,5	12,0	41,0							1.261,5	

Fonte: Elaborada pela autora, com base nos dados do Setor Agrícola da Destilaria Serra dos Aimorés.

Nas visitas técnicas realizadas em áreas de produção de cana-de-açúcar da Serra dos Aimorés, a autora desta pesquisa pode constatar que, devido principalmente à irregularidade da distribuição e do volume das chuvas na região, ao sincronismo entre o planejamento e a execução das atividades foi fundamental para uma boa implantação do canavial. Outra observação foi que os canaviais bem implantados, com bom número de perfilhos (brotos), tiveram maior produtividade e menores decréscimos de produção entre os ciclos.

Em uma visita realizada em janeiro, época que antecede a implantação dos canaviais, foram observadas áreas de reforma de canavial prontas para o plantio da cana-de-açúcar. Essas áreas haviam recebido calagem e o solo estava arado, gradeado e subsolado. Os proprietários dessas áreas aguardavam apenas chuva em volume suficiente para realizar a sulcagem, adubação e plantio. Em outras áreas, os produtores ainda aguardavam a chegada do calcário para, após sua aplicação, iniciar o preparo do solo. Conforme informações obtidas com os técnicos e produtores da região, chuva de apenas 50 mm é suficiente para garantir boa germinação dos toletes, tendo reflexos na densidade populacional, fechamento mais rápido das entrelinhas da cana, o que

reflete em melhor controle de plantas daninhas, por aumentar a eficácia do herbicida usado, interferindo positivamente na produtividade da cana-planta e repercutindo em menores decréscimos ao longo dos ciclos. Um dos produtores expressou sua preocupação com um plantio bem feito, usando a seguinte expressão: “Alguns erros cometidos na implantação do canavial somente poderão ser corrigidos daqui a cinco ou seis anos, quando formos realizar novo plantio”. Sendo a cana-de-açúcar uma cultura semi-perene é necessário estar atento a detalhes, principalmente quanto ao planejamento e à execução do cronograma de atividades, para se ter uma lavoura produtiva.

O perfil dos 79 canavicultores da Serra dos Aimorés pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Perfil dos canavicultores da Serra dos Aimorés.

Variável	Grupo	%
Escolaridade	Superior	62
	Médio	29
	Fundamental	9
Sexo	Masculino	88
	Feminino	12
Faixa etária	20-30 anos	1
	31-40 anos	8
	41-50 anos	25
	51-60 anos	16
	61-70 anos	27
	71-80 anos	21
	80-90 anos	2
Tempo que é proprietário da fazenda	Mais de 10 anos	64
	Entre 6 e 10 anos	35
	Entre 2 e 5 anos	1
Área de plantio própria, sem arrendamento		85
Reside na propriedade		20
Possui outras rendas		91
Possui aposentadoria		31
A cana é a sua principal atividade		30
Participa de cursos e treinamentos		19

Percebe-se que, na maioria, os canavicultores da região da Serra dos Aimorés possuem nível superior, são do sexo masculino, com faixa etária entre 41 e 80 anos e com mais de 10 anos de propriedade da fazenda. Um fato surpreendente é que 70% dos proprietários não têm a cultura da cana como sua principal atividade e 91% possuem outras rendas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme mencionado no Capítulo 3, foram adotadas três abordagens para analisar os dados das 79 fazendas canavieiras da região da Serra dos Aimorés. Na primeira abordagem, com base em Barbetta *et al.*, (2008) e Ribeiro Júnior (2008), foram usados a estatística descritiva e a análise de regressão para analisar os dados referentes aos ciclos da cana-planta à quinta rebrota da cana. Na segunda abordagem, para esse mesmo ciclo produtivo, aplicou-se a ferramenta Análise Envoltória de Dados – modelos RCE e RVE –, por meio dos softwares *General Algebraic Modeling System* (GAMS) e EMS (*Efficiency Measurement System*), para verificar a eficiência técnica e de escala de cada DMU, comparando-as dentro de cada ciclo produtivo (cana-planta e quatro rebrotas). Na terceira abordagem, por meio do software *KonSi Malmquist Index*, foram calculadas as variações técnicas e tecnológicas ao longo das rebrotas da cana e, com base nos resultados dessas variações, calculou-se o Índice de Produtividade dos Fatores de Produção (Índice de *Malmquist*).

A amostra, constituída por 79 fazendas, foi dividida em dois grupos: Grupo 1 – fazendas que aplicaram adubo orgânico (vinhaça) nas rebrotas da cana-de-açúcar e, Grupo 2 – fazendas que aplicaram adubo químico nas rebrotas. Dessa forma, o Grupo 1 foi formado por 20 fazendas – 100 DMUS (500 observações) – e o Grupo 2 por 59 fazendas – 295 DMUs (1.475 observações). Neste estudo, foram consideradas as variáveis: área do talhão, calcário, adubo químico, adubo orgânico, herbicida, inseticida químico e produção de colmos industrializáveis.

5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DAS VARIÁVEIS DE *INPUTS* E *OUTPUT* DOS GRUPOS 1 E 2

Para avaliar a eficiência e o índice de produtividade total dos fatores, o uso da estatística descritiva é dispensável, pois a fronteira de eficiência é estimada considerando-se os valores relativos às quantidades de insumo e produto medidas para cada unidade de decisão. Porém, com o propósito de complementar a análise e apresentar as

variáveis, foram realizadas análise descritiva e análise de regressão das variáveis de *input* e *output*.

Na Tabela 5, são apresentados os resultados da estatística descritiva das variáveis dos Grupos 1 e 2. Estes resultados referiram-se ao ciclo de 2006 a 2011 – cana-planta à quarta rebrota da cana – e, para que comparações múltiplas pudessem ser realizadas, os talhões foram convertidos em unidade de área (ha), uma vez que a área dos talhões era diferente.

Tabela 5 - Estatística descritiva das variáveis usadas no estudo de um sistema de produção de cana-de-açúcar.

GRUPO 1	Estatística descritiva	Produtividade (t/ha)	Calcário (t/ha)	Adubo orgânico (m ³ /ha)	Herbicida (kg/ha)	Inseticida químico (kg/ha)
	Média	84,37	0,55	33,68	2,66	0,65
	Desvio Padrão	17,68	0,06	18,59	0,56	0,43
	C.V(%)	21,0	11,9	55,2	21,2	66,3
	Mínimo	58,45	0,40	0,00	2,00	0,13
	Máximo	129,27	0,68	50,00	3,50	1,00
GRUPO 2	Estatística descritiva	Produtividade (t/ha)	Calcário (t/ha)	Adubo químico (t/ha)	Herbicida (kg/ha)	Inseticida químico (kg/ha)
	Média	84,56	0,57	0,25	2,61	0,65
	Desvio Padrão	18,32	0,08	0,13	0,51	0,43
	C.V(%)	21,7	14,6	54,5	19,6	66,1
	Mínimo	36,95	0,40	0,00	2,00	0,13
	Máximo	138,39	0,76	0,50	3,50	1,00

No Grupo 1, a produtividade média de colmos industrializáveis foi de 84,37 (mín. 58,45 e máx. 129,27) toneladas por ha, enquanto a produtividade média das fazendas do Grupo 2 foi de 84,56 (mín. 36,95 e máx. 138,39) toneladas de colmos industrializáveis por hectare.

Oliveira *et al.*, (2012), ao avaliarem a tecnologia e os custos de produção de cana-de-açúcar, em uma propriedade de 419 hectares no Triângulo Mineiro, relataram produtividade média de 86 t de colmos industrializáveis, nas safras de 2002/2003 a 2008/2009. Moreira e Bonizio (2012) também encontraram valores médios de produtividade próximos ao deste estudo, 82 t/ha em propriedades de grande porte. Nessa mesma ordem de grandeza, produtividades médias foram citadas por Morelli *et al.*, (1987) em estudos com doses de gesso e calcário, mas

inferiores aos citados por Dias *et al.*, (1999), em avaliações de experimentos de competição varietal instalados pelo Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar da Universidade Federal de São Carlos, nos municípios de Araçatuba (171 t/ha), Clementina (111 t/ha), Estrela do Oeste (108 t/h) e Valparaíso (96 t/h).

Deve-se, entretanto, ressaltar que os resultados deste estudo são a média de lavouras com cinco ciclos, enquanto nos trabalhos citados anteriormente, avaliaram-se, na maioria das vezes, a cana-planta e a de primeira rebrota. Considerando os diversos ciclos e a área plantada, pode-se afirmar que, conforme Vitti e Mazza (2002), Demattê (2005); Oliveira *et al.*, (2007), a produtividade média das propriedades canavieiras da região da Serra dos Aimorés é de média a alta.

Na Tabela 6 são mostrados os decréscimos médios de produtividade, bem como a quantidade média de insumos aplicada nos ciclos da cana-planta à quarta rebrota. Para tanto, foram consideradas as variáveis de entrada citadas no Quadro 3.

Tabela 6 - Média das variáveis de entrada e saída, por ciclo, dos Grupos 1 e 2.

Variáveis	Cana-planta	Primeira rebrota	Segunda rebrota	Terceira rebrota	Quarta rebrota	
	(2007)	(2008)	(2009)	(2010)	(2011)	
.....média por ciclo.....						
GRUPO 1	Calcário (t/ha)	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
	Adubo orgânico (m ³ /ha)	0,00	45,88	43,22	41,10	38,21
	Herbicida (kg/ha)	3,04	2,73	2,67	2,56	2,29
	Inseticida químico (kg/ha)	0,13	0,13	1,00	1,00	1,00
	Produção (t/ha)	111,38	91,31	80,39	73,04	65,72
GRUPO 2	Calcário (t/ha)	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
	Adubo químico (t/ha)	0,00	0,33	0,32	0,30	0,29
	Herbicida (kg/ha)	3,06	2,81	2,62	2,38	2,26
	Inseticida químico (kg/ha)	0,13	0,13	1,00	1,00	1,00
	Produção (t/ha)	108,36	92,19	82,32	73,15	66,80

Os decréscimos médios de produtividade da cana-planta à quarta rebrota foram de 20,1; 11,0; 7,4; e 7,3 t (Grupo 1) e de 16,2; 9,9; 9,2; e 6,4 t (Grupo 2). Observa-se que os maiores decréscimos de produtividade ocorreram da cana-planta para a primeira rebrota (cerca de 18% no Grupo 1 e 15% no Grupo 2). Esse decréscimo de produtividade de um corte para outro deve-se, dentre outros fatores, à compactação do solo causada pelo trânsito de máquinas, à acidificação do terreno ocasionada pelo uso de fertilizantes nitrogenados, à redução da disponibilidade de nutrientes no solo e ao afloramento do sistema

radicular da cana-de-açúcar (DEMATTE, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2007; RAIJ, 2011). Segundo Alfonsi *et al.*, (1987); Oliveira *et al.*, (2007), dentre outros fatores, o fator de produção que isoladamente causa maior queda na produtividade de uma lavoura de cana-de-açúcar é a disponibilidade de água no solo, necessária em maior quantidade na fase de crescimento da planta.

No Centro-Sul do Brasil encontram-se as lavouras de cana-de-açúcar que têm as maiores produtividades de colmos industrializáveis. Essas lavouras apresentaram produtividade que oscilaram em torno de 110 t de colmos por hectare, para a cana-planta de ano e meio; e, para a primeira, segunda, terceira e quarta rebrotas, as produtividades médias destas lavouras, respectivamente, foram de 90; 78; 71; e 68 t de colmos industrializáveis por hectare (SEGATO *et al.*, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2007). Dessa forma, os decréscimos de produtividade médios observados nas lavouras de cana-de-açúcar da região da Serra dos Aimorés são semelhantes aos das melhores lavouras do Centro-sul do Brasil.

Para verificar a existência de relação entre a variável independente (produtividade) e as variáveis dependentes (custos e lucro), foram feitas análises de regressão linear dos dados dos Grupos 1 e 2. Em razão de as fazendas terem usado adubos diferentes na cana-planta e nas rebrotas da cana, fez-se, individualmente, análise de regressão dos dados da cana-planta e das rebrotas da cana em ambos os grupos. Na Tabela 7 estão dispostos os resultados da análise de regressão linear dos dados do Grupo 1.

Tabela 7 - Análise de regressão linear das fazendas que utilizaram adubo orgânico (Grupo 1) na adubação das rebrotas da cana-de-açúcar, no período de 2006 a 2011.

Grupo 1 Cana-planta	Produtividade e custos por hectare	Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	<i>Custos (y) em R\$/ha (variável resposta)</i>			
	Intercepto (constante)	1.285	71	0,00
	Produtividade (x) em t/ha	17	0,63	0,00
	Número de observações: n = 100			
	Coeficiente de determinação (R ²): 0,8798			
Grupo 1 Cana-planta	Produtividade e lucro por hectare	Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	<i>Lucro (y) em R\$/ha (variável resposta)</i>			
	Intercepto (constante)	- 1.285	71	0,00
	Produtividade (x) em t/ha	29	0,63	0,00
	Número de observações: n = 100			
	Coeficiente de determinação (R ²): 0,9555			
Grupo 1 Rebrotas	Produtividade e custos por hectare	Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	<i>Custos (y) em R\$/ha (variável resposta)</i>			
	Intercepto (constante)	1.330	36	0,00
	Produtividade (x) em t/ha	18	0,46	0,00
	Número de observações: n = 400			
	Coeficiente de determinação (R ²): 0,7996			
Grupo 1 Rebrotas	Produtividade e lucro por hectare	Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	<i>Lucro (y) em R\$/ha (variável resposta)</i>			
	Intercepto (constante)	- 1.330	36	0,00
	Produtividade (x) em t/ha	27	0,46	0,00
	Número de observações: n = 400			
	Coeficiente de determinação (R ²): 0,8968			

Com base na Tabela 7, podem-se obter as equações que tentam explicar a variação da variável dependente pela variação do nível da variável independente. Assim, no Grupo 1 (cana-planta), a relação estimada entre o custo total e a produtividade é representada pela equação:

$$\text{“Custos Grupo 1 (cana-planta) = 1.285 + 17 * Produtividade”},$$

o que mostra custos fixos de R\$1.285,00/ha e custos variáveis de R\$17,00/t. Considerando preço de venda de R\$45,54/t, chega-se a uma margem de contribuição (MC) unitária de R\$28,54/t (R\$45,54 - R\$17,00) e ponto de equilíbrio (PE) de 45,02 t/ha (R\$1.285/R\$28,54).

Analisando as rebrotas da cana, do Grupo 1, esta relação é representada pela equação:

$$\text{“Custos Grupo 1 (rebrotas da cana) = 1.330 + 18 * Produtividade”},$$

considerando o mesmo preço de venda, obteve-se uma MC unitária de R\$27,54. O que significa que um aumento de uma tonelada de cana na produção por hectare acarreta acréscimo de R\$27,54 no lucro. O PE das

rebrotas da cana foi de 48,29 t/ha.

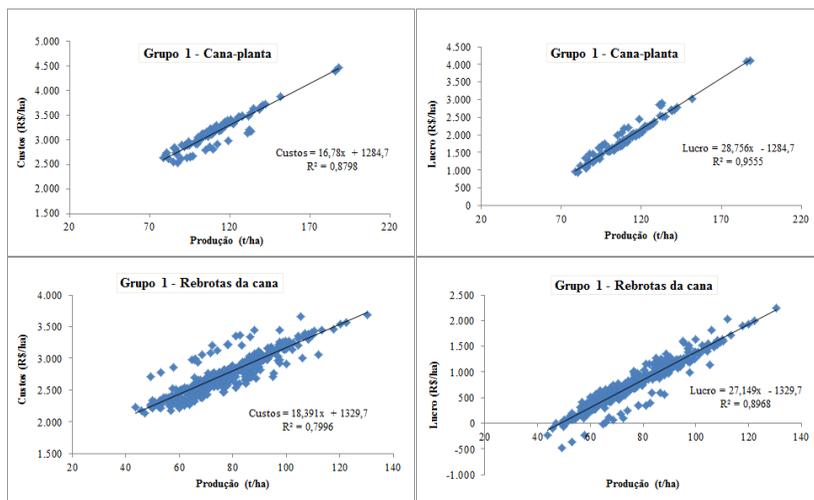
Constatou-se, também, que, tanto na cana-planta como nas rebrotas, houve relação positiva entre produtividade da lavoura e lucro, em R\$/ha, como é o esperado. Pela Tabela 7, verifica-se que tal relação pode ser descrita pelas equações:

$$\text{“Lucro Grupo 1 (cana-planta)} = 29 \cdot \text{Produtividade} - 1.285\text{”}.$$

$$\text{“Lucro Grupo 1 (rebrotas da cana)} = 27 \cdot \text{Produtividade} - 1.330\text{”}.$$

Para verificar o comportamento dos valores da variável dependente (Y) em função da variação da variável independente (X), na Figura 18 estão apresentados os diagramas de dispersão das relações entre custo e produtividade, bem como entre lucro e produtividade da cana-planta e das rebrotas da cana, do Grupo 1.

Figura 18 - Relação entre produtividade e custo e produtividade e lucro do Grupo 1.



Na Tabela 8, estão dispostos os resultados da análise de regressão linear dos dados do Grupo 2.

Tabela 8 - Análise de regressão linear das fazendas que utilizaram adubo químico (Grupo 2) na adubação das rebrotas da cana-de-açúcar, no período de 2006 a 2011.

Grupo 2 Cana-planta	Produtividade e custos por hectare	Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	<i>Custos (y) em R\$/ha (variável resposta)</i>			
	Intercepto (constante)	1.343	30	0,00
	Produtividade (x) em t/ha	17	0,27	0,00
	Número de observações: n = 295			
	Coefficiente de determinação (R ²): 0,9327			
	Produtividade e lucro por hectare	Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	<i>Lucro (y) em R\$/ha (variável resposta)</i>			
	Intercepto (constante)	-1343	30	0,00
	Produtividade (x) em t/ha	28	0,27	0,00
Número de observações: n = 295				
Coefficiente de determinação (R ²): 0,9740				
Grupo 2 Rebrotas	Produtividade e custos por hectare	Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	<i>Custos (y) em R\$/ha (variável resposta)</i>			
	Intercepto (constante)	1.454	16	0,00
	Produtividade (x) em t/ha	22	0,21	0,00
	Número de observações: n = 1.180			
	Coefficiente de determinação (R ²): 0,9040			
	Produtividade e lucro por hectare	Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	<i>Lucro (y) em R\$/ha (variável resposta)</i>			
	Intercepto (constante)	-1454	16	0,00
	Produtividade (x) em t/ha	24	0,21	0,00
Número de observações: n = 1.180				
Coefficiente de determinação (R ²): 0,9183				

No Grupo 2 (cana-planta), a relação estimada entre o custo total e a produtividade é representada pela equação:

$$\text{“Custos Grupo 2} = 1.343 + 17 * \text{Produtividade”}$$

o que significa custos fixos de R\$1.343,00/ha e custos variáveis de R\$17,00/t. A margem de contribuição unitária foi de R\$28,54/t e o PE foi de aproximadamente 47 t de colmos por hectare. Resultados semelhantes foram obtidos por Carvalho (2006) em pesquisa conduzida no estado de São Paulo, na qual o autor apontou que, para cobrir os custos operacionais, foram necessárias 53 toneladas de cana. Já Oliveira *et al.*, (2012), em estudo realizado em uma fazenda de 650 hectares em Iturama, estado de Minas Gerais, verificaram relação de troca de 33 toneladas de cana por hectare, considerando um valor de venda de R\$45,00 a tonelada de cana. Contudo, Carvalho (2006) encontrou o ponto de equilíbrio para cobrir os custos operacionais, enquanto Oliveira *et al.*, (2012) não consideraram o custo de mecanização da lavoura, da depreciação de equipamentos e das benfeitorias, assim como a remuneração do capital investido, o que reduziu o ponto de equilíbrio,

comparativamente ao encontrado neste estudo.

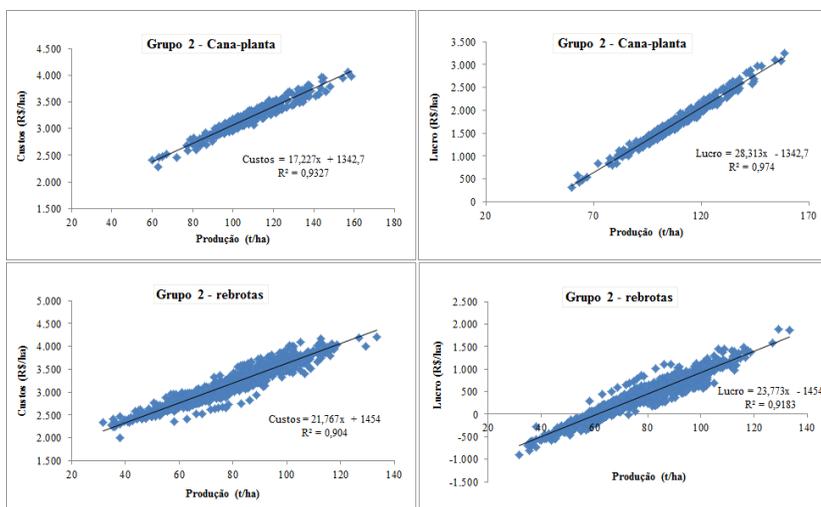
Constatou-se, também, que, tanto na cana-planta como nas rebrotas, houve relação positiva entre produtividade da lavoura e lucro, em R\$/ha. Pela Tabela 8, verifica-se que tal relação pode ser descrita pelas equações:

$$\text{“Lucro Grupo 2 (cana-planta)} = 28 * \text{Produtividade} - 1.343\text{”}$$

$$\text{“Lucro Grupo 2 (rebrotas da cana)} = 24 * \text{Produtividade} - 1.454\text{”}$$

Na Figura 19 estão apresentados os diagramas de dispersão das relações entre custo e produtividade, bem como entre lucro e produtividade da cana-planta e das rebrotas da cana, do Grupo 2.

Figura 19 - Relação entre produtividade e custos e produtividade e lucro do Grupo 2.



Na média, as produtividades das fazendas da região da Serra dos Aimorés encontram-se acima do ponto de equilíbrio. Porém, nos dois grupos, observou-se grande variabilidade entre os valores mínimo e máximo. Consequentemente, essa heterogeneidade na produtividade de colmos de cana poderá influenciar fortemente os resultados financeiros dessas fazendas.

Em ambos os grupos houve correlação positiva entre custos e produtividade ($p < 0,001$), pois, conforme Vitti e Mazza, 2002; Demattê, 2005; Oliveira *et al.*, 2007; RAIJ, 2011, para produzir maiores quantidades de toneladas de cana é necessário fornecer maiores

quantidades de nutrientes (insumos), uma vez que a remoção de nutrientes pela cana é alta, o que demanda reposição de elementos minerais pela adubação. No Grupo 1, houve forte correlação entre as variáveis custos e produtividade ($R^2 = 82,03\%$), enquanto no Grupo 2 o coeficiente de determinação foi de 63,73%, indicando moderada correlação entre as duas variáveis.

Quanto à produtividade e lucro, houve efeito altamente significativo ($p < 0,001$), tanto na cana-planta quanto nas rebrotas, em ambos os grupos, uma vez que estes mostraram coeficiente de determinação (R^2) de 95,55% (na cana-planta) e de 89,68% (nas rebrotas) do Grupo 1; e de 97,4% (na cana-planta) e de 91,83% (nas rebrotas) do Grupo 2. O coeficiente de determinação (R^2) indica o percentual de variabilidade da variável dependente explicada pela variável independente. Assim, o R^2 do Grupo 1 (cana-planta) indica que cerca de 95% da variação no lucro pode ser explicada pela variação na produtividade. Essa correlação dos dois grupos de fazendas pode estar associada à melhor utilização dos fatores de produção. Por exemplo, aqueles produtores que melhor gerenciaram a sua fazenda, atentando para o plantio na época recomendada, tratos culturais adequados e alocação correta das variedades nos diferentes ambientes edafoclimáticos da propriedade. Todas essas práticas, conforme citado por Oliveira *et al.*, (2007); Ferreira e Gomes (2009); Raj (2011); Oliveira *et al.*, (2012), associadas às de conservação de solo, calagem, gessagem, adubação, controle de plantas daninhas e pragas, bem como adequado manejo do canavial, podem refletir em maior índice de eficiência técnica, tecnológica e de escala de produção das propriedades canavicultoras.

Na seção a seguir, são apresentados e discutidos os resultados das eficiências técnica e de escala de produção utilizando-se a modelagem Análise Envoltória de Dados, modelos DEA/RCE e DEA/RVE, das 79 fazendas que compuseram os Grupos 1 e 2.

5.2 EFICIÊNCIA TÉCNICA E DE ESCALA DAS 79 FAZENDAS POR MEIO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS

Nesta seção, são expostos e discutidos os resultados da cana-planta à quarta rebrota dos Grupos 1 e 2. Conforme mostrado na seção 3.2, as variáveis de *inputs* do Grupo 1 são: área do talhão; calcário; adubo orgânico; herbicida químico e inseticida químico, e, as variáveis

de *inputs* do Grupo 2 são: área do talhão; calcário; adubo químico; herbicida químico e inseticida químico. Ambos os grupos tiveram a produção de colmos industrializáveis como variável de *output*.

Para avaliar as eficiências técnica e de escala dessas variáveis, utilizaram-se os *softwares* GAMS e EMS. De posse dos escores de eficiência técnica, nos modelos RCE e RVE, das 79 fazendas (1975 dados), foram verificados os índices de eficiência de escala dessas DMUs. O índice de eficiência de escala ou eficiência de escala global é o resultado da divisão do índice de eficiência técnica no modelo RCE pelo índice de eficiência técnica no modelo RVE. Para melhor entendimento e visualização dos resultados, com base nos escores de eficiência de escala inferiores a uma unidade, foram adotados critérios de categorização das DMUs tomando-se como referência a média e o desvio-padrão, procedimentos semelhantes aos adotados por Silva *et al.*, (2012) e Ferreira *et al.*, (2013). Porém, na tentativa de diminuir a concentração de DMUs na classe central, alterou-se o critério de categorização de três classes adotado por esses autores e, neste estudo, optou-se por considerar quatro classes. Dessa forma, as classes para os Grupos 1 e 2 foram assim constituídas:

- 1ª classe:** índices de eficiência menores que a média menos um desvio padrão (DP);
- 2ª classe:** índices de eficiência compreendidos entre a média e a média menos um DP;
- 3ª classe:** índices de eficiência compreendidos entre a média e a média mais um DP e menores que um;
- 4ª classe:** índices de eficiência iguais a um.

Nessa classificação, encontram-se, relativamente, as DMUs, com desempenho ruim (1ª classe); desempenho regular (2ª classe); desempenho bom (3ª classe); e, desempenho ótimo (4ª classe). Uma vez categorizadas as DMUs, foram analisados separadamente os resultados dos Grupos 1 e 2. Dessa forma, na Tabela 9 e na Tabela 10, são apresentados o ciclo, a categorização das DMUs, os escores de eficiência de escala e o desempenho do grupo de DMUs quanto ao uso dos insumos no sistema de produção de cana.

Tabela 9 - Classificação das DMUs do Grupo 1 em relação aos escores de eficiência de escala por meio da abordagem DEA/RCE e DEA/RVE, nos ciclos de cana-planta à quarta rebrota.

Ciclo	Classe	Critério de classificação	Número de DMUs	Escores de eficiência de escala	Desempenho quanto ao uso dos insumos
Cana-planta (2007)	1	Valores inferiores à média menos um desvio-padrão (DP)	11	< 0,7620	Ruim
	2	Valores compreendidos entre a média e a média - 1 DP	12	0,7620 < E < 0,8804	Regular
	3	Valores compreendidos entre a média e a média + 1 DP	45	0,8804 < E < 1	Bom
	4	Valores iguais a um	32	E = 1	Ótimo
Primeira rebrota (2008)	1	Valores inferiores à média menos um desvio-padrão (DP)	7	< 0,8460	Ruim
	2	Valores compreendidos entre a média e a média - 1 DP	25	0,8460 < E < 0,9227	Regular
	3	Valores compreendidos entre a média e a média + 1 DP	46	0,9227 < E < 1	Bom
	4	Valores iguais a um	22	E = 1	Ótimo
Segunda rebrota (2009)	1	Valores inferiores à média menos um desvio-padrão (DP)	2	< 0,8342	Ruim
	2	Valores compreendidos entre a média e a média - 1 DP	3	0,8342 < E < 0,9168	Regular
	3	Valores compreendidos entre a média e a média + 1 DP	15	0,9168 < E < 1	Bom
	4	Valores iguais a um	80	E = 1	Ótimo
Terceira rebrota (2010)	1	Valores inferiores à média menos um desvio-padrão (DP)	6	< 0,8725	Ruim
	2	Valores compreendidos entre a média e a média - 1 DP	14	0,8725 < E < 0,9359	Regular
	3	Valores compreendidos entre a média e a média + 1 DP	35	0,9359 < E < 1	Bom
	4	Valores iguais a um	45	E = 1	Ótimo
Quarta rebrota (2011)	1	Valores inferiores à média menos um desvio-padrão (DP)	15	< 0,8591	Ruim
	2	Valores compreendidos entre a média e a média - 1 DP	14	0,8591 < E < 0,9293	Regular
	3	Valores compreendidos entre a média e a média + 1 DP	60	0,9293 < E < 1	Bom
	4	Valores iguais a um	11	E = 1	Ótimo

Com base no critério de classificação das DMUs exposto no Tabela 9 pode-se observar que, no total dos cinco ciclos, 8,2% das DMUs tiveram desempenho ruim, 13,6% foram consideradas de desempenho regular; 40,2% de desempenho bom; e 38% tiveram desempenho ótimo quanto ao uso dos insumos no sistema de produção de cana. Os piores desempenhos ocorreram entre as DMUs da quarta rebrota da cana – como já se esperava – pois, segundo Vitti e Mazza (2002); Demattê (2005); Raij (2011); Oliveira *et al.*, (2013), a cultura extrai grande quantidade de nutrientes do solo e, também, nas últimas rebrotas do canal, demanda-se adoção de práticas culturais eficientes, por exemplo, restauração da fertilidade do solo e maior controle de plantas daninhas e de pragas, além de ocorrer alterações físicas no solo que diminuem a infiltração de água e as trocas gasosas. Com o avançar dos ciclos, há afloramento do sistema radicular da cana, reduzindo consequentemente a absorção de água e de nutrientes, impactando diretamente na eficiência produtiva da cultura.

Os melhores desempenhos relativos, entre as DMUs, ocorreram na segunda rebrota (safra 2009), de um total de 100 DMUs, 80 apresentaram desempenho ótimo neste período, ou seja, índices iguais a

uma unidade. Neste mesmo ano, apenas cinco DMUs mostraram índices de eficiência inferiores à média. Uma das possíveis causas seriam chuvas localizadas após o corte da cana e cultivo da entrelinha e adubação das rebrotas. A autora, em uma das visitas técnicas, pôde observar grande vigor da rebrota em um canavial de uma das propriedades avaliadas. Segundo o proprietário, o corte e o transporte da cana ocorreram com o solo seco, mas logo após o cultivo e adubação houve chuva localizada de cerca de 30 mm. Essas chuvas localizadas somente poderiam ser medidas se houvesse em cada talhão uma estação climatológica automatizada, o que é inviável devido ao custo do equipamento e possibilidade de roubo ou avaria.

Na Tabela 10 são apresentados os escores de eficiência de escala das 59 fazendas que compõem o Grupo 2. Ao analisar os resultados deste grupo, média dos ciclos da cana-planta à quarta rebrota, verifica-se que apenas 4,1% das DMUs apresentaram desempenho ruim, 8,7% desempenho regular, 27,2% desempenho bom e a maioria das DMUs (60%) tiveram desempenho considerado ótimo na relação insumo-produto comparativamente às outras DMUs desse mesmo ciclo. Houve grande variação de desempenho entre as três primeiras classes e a quarta classe, com concentração de DMUs com ótimo desempenho, a partir da segunda rebrota.

Para melhor entender o comportamento dessas DMUs, seria necessário avaliar cada DMU individualmente. No entanto, algumas possibilidades podem ter acontecido, por exemplo, nas DMUs que tiveram aumento de produtividade na terceira e quarta rebrotas, o aumento nas DMUs eficientes poderia ser explicado em razão de chuvas menos intensas, porém, associadas à insolação. Quando o volume de chuvas é menor, ocorre maior infiltração de água no solo e, quando muito intensa, há menor infiltração proporcional no solo (entra em contato com o solo e escore). Assim, nas DMUs que tiveram decréscimo de produtividade em todos os ciclos, o aumento do número de DMUs eficientes poderia ser explicado pela redução no uso de insumos, associado às chuvas menos intensas seguidas de insolação. Conforme observado por Ruiz *et al.*, (1990), pequenas alterações no teor de água disponível no solo têm grande influência na absorção do nutriente, translocação para a parte aérea da planta e, consequentemente, aumento da eficiência nutricional da planta. Eficiência nutricional é o quociente entre a quantidade de produto pela quantidade de nutrientes. Por exemplo, um canavial acumulou 150 kg de nitrogênio na parte aérea e produziu 180 t de colmos, a eficiência nutricional é de 1,2 t de

colmos/kg de nitrogênio.

Tabela 10 - Classificação das DMUs do Grupo 2 em relação aos escores de eficiência de escala por meio da abordagem DEA/RCE e DEA/RVE, nos ciclos de cana-planta à quarta rebrota.

Ciclo	Classe	Critério de classificação	DMUs	Escores de eficiência de escala	Desempenho quanto ao uso dos insumos
Cana-planta (2007)	1	Valores inferiores à média menos um desvio-padrão (DP)	20	< 0,8569	Ruim
	2	Valores compreendidos entre a média e a média - 1 DP	37	0,8569 < E < 0,9284	Regular
	3	Valores compreendidos entre a média e a média + 1 DP	120	0,9284 < E < 1	Bom
	4	Valores iguais a um	118	E = 1	Ótimo
Primeira rebrota (2008)	1	Valores inferiores à média menos um desvio-padrão (DP)	16	< 0,8748	Ruim
	2	Valores compreendidos entre a média e a média - 1 DP	43	0,8748 < E < 0,9374	Regular
	3	Valores compreendidos entre a média e a média + 1 DP	124	0,9374 < E < 1	Bom
	4	Valores iguais a um	112	E = 1	Ótimo
Segunda rebrota (2009)	1	Valores inferiores à média menos um desvio-padrão (DP)	12	< 0,8516	Ruim
	2	Valores compreendidos entre a média e a média - 1 DP	17	0,8516 < E < 0,9257	Regular
	3	Valores compreendidos entre a média e a média + 1 DP	67	0,9257 < E < 1	Bom
	4	Valores iguais a um	199	E = 1	Ótimo
Terceira rebrota (2010)	1	Valores inferiores à média menos um desvio-padrão (DP)	6	< 0,8304	Ruim
	2	Valores compreendidos entre a média e a média - 1 DP	16	0,8304 < E < 0,9152	Regular
	3	Valores compreendidos entre a média e a média + 1 DP	42	0,9152 < E < 1	Bom
	4	Valores iguais a um	231	E = 1	Ótimo
Quarta rebrota (2011)	1	Valores inferiores à média menos um desvio-padrão (DP)	6	< 0,8113	Ruim
	2	Valores compreendidos entre a média e a média - 1 DP	15	0,8113 < E < 0,9054	Regular
	3	Valores compreendidos entre a média e a média + 1 DP	48	0,9054 < E < 1	Bom
	4	Valores iguais a um	226	E = 1	Ótimo

Com o propósito de não tornar a discussão muito extensa ao apresentar os índices individuais de cada DMU dos dois Grupos, na Tabela 11e na Tabela 12, são mostrados sumários das médias dos índices, por ano de colheita da cana, assim como os demais resultados de uma análise estatística descritiva de cada Grupo de fazendas.

Conforme mostrado na Tabela 11, no modelo retornos constantes (RC ou CCR), percebe-se que no ano de 2009 (colheita da segunda rebrota da cana) houve maior percentual de DMUs eficientes (9%), enquanto no modelo retornos variáveis (RV ou BCC) o maior percentual (23%) ocorreu em 2011 (quarta rebrota), comparativamente às do mesmo período. Nas safras 2009 e 2010 ocorreram os maiores números de DMUs que operaram em escala ótima, ou seja, com eficiência de escala igual a uma unidade, respectivamente, 13 e 12%. Para as fazendas que usaram adubo químico nas rebrotas da cana (Grupo 2), considerando os mesmos modelos adotados no Grupo 1, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 11 - Sumário das médias dos índices de eficiências técnicas e de escala, do Grupo 1, calculadas por ano.

Índices de eficiência	Estatística descritiva dos números-índices	Ano da colheita				
		2007	2008	2009	2010	2011
Modelo retorno constante de escala	Média	0,68	0,76	0,85	0,81	0,76
	Mínimo	0,42	0,51	0,51	0,55	0,49
	Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Desvio-padrão	0,15	0,11	0,11	0,12	0,12
	CV (%)	22,4	14,2	12,4	14,5	15,7
	Nº de DMUs eficientes	3	3	9	7	2
	% de DMUs eficientes	3	3	9	7	2
Modelo retorno variável de escala	Média	0,74	0,82	0,87	0,85	0,81
	Mínimo	0,47	0,52	0,52	0,56	0,51
	Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Desvio-padrão	0,16	0,12	0,11	0,13	0,14
	CV (%)	21,8	14,5	12,2	14,9	17,6
	Nº de DMUs eficientes	11	13	18	18	23
	% de DMUs eficientes	11	13	18	18	23
Eficiência de escala global	Média	0,92	0,94	0,98	0,96	0,94
	Mínimo	0,50	0,56	0,68	0,70	0,59
	Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Desvio-padrão	0,11	0,07	0,05	0,06	0,07
	CV (%)	12,2	7,9	4,9	5,8	7,4
	Nº de DMUs eficientes	6	4	13	12	3
	% de DMUs eficientes	6	4	13	12	3

Tabela 12 - Sumário das médias dos índices de eficiências técnicas e de escala, do Grupo 2, calculadas por ano.

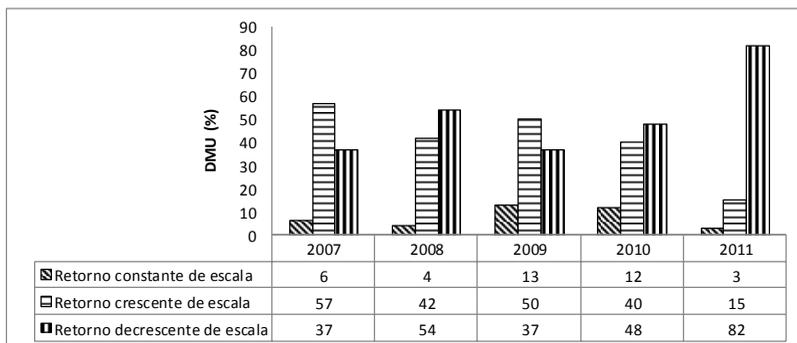
Índice de eficiência	Estatística descritiva dos índices de eficiência	Ano da colheita				
		2007	2008	2009	2010	2011
Modelo retorno constante de escala	Média	0,73	0,76	0,75	0,76	0,74
	Mínimo	0,38	0,48	0,44	0,42	0,35
	Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Desvio-padrão	0,12	0,10	0,11	0,14	0,15
	CV (%)	16,0	13,1	14,4	18,1	20,4
	Nº de DMUs eficientes	5	7	5	5	7
	% de DMUs eficientes	1,7	2,4	1,7	1,7	2,4
Modelo retorno variável de escala	Média	0,77	0,79	0,77	0,78	0,76
	Mínimo	0,42	0,49	0,47	0,44	0,40
	Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Desvio-padrão	0,12	0,11	0,11	0,14	0,15
	CV (%)	16,0	13,5	14,7	17,7	19,6
	Nº de DMUs eficientes	17	19	15	18	17
	% de DMUs eficientes	5,8	6,4	5,1	6,1	5,8
Eficiência de escala global	Média	0,95	0,96	0,97	0,98	0,97
	Mínimo	0,53	0,55	0,49	0,53	0,47
	Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Desvio-padrão	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06
	CV (%)	6,7	5,9	5,4	5,2	6,1
	Nº de DMUs eficientes	13	13	9	21	23
	% de DMUs eficientes	4,4	4,4	3,1	7,1	7,8

Pela Tabela 12, considerando retornos constantes, percebe-se que em 2007, 2009 e 2010 os percentuais de DMUs eficientes foram os mesmos (1,7%) e nos anos de 2008 e 2011 houve maior percentual de DMUs eficientes (2,4%), enquanto no modelo retornos variáveis o maior percentual (6,4%) ocorreu em 2008 (primeira rebrota), comparativamente às do mesmo período. Nas safras 2010 e 2011 ocorreram os maiores números de DMUs que operaram em escala ótima de produção, respectivamente, 7,1 e 7,8%.

A eficiência técnica de uma unidade de produção é medida por meio de retornos constantes (RCE) e retornos variáveis de escala de produção (RVE). Porém, quando o conjunto de DMUs tem tamanhos diversos, sugere-se combinar os modelos RVE e RCE no mesmo conjunto de dados, para determinar a natureza da escala de uma DMU. Caso haja diferença nos valores de eficiência técnica de determinada unidade de produção, conclui-se que essa unidade tem ineficiência de escala, que pode ser calculada pela relação entre os valores de eficiência técnica com retornos variáveis e com retornos constantes. Assim, conforme Banker (1984); Ray (2004); Cook e Zhu (2008); Ferreira e Gomes (2009); Mulwa *et al.*, (2009), os rendimentos de escala podem apresentar os seguintes comportamentos: (i) rendimentos constantes de escala (RC) (ii) rendimentos variáveis de escala (RV); (iii) rendimentos não crescentes de escala (RNC); e, (iv) rendimentos não decrescentes de escala (RND).

Na Figura 20 são mostrados os tipos de retornos de escala das DMUs do Grupo 1. Pode-se observar pela Figura 20 que apenas 6% das DMUs, no ano de 2007, operaram com retornos constantes de escala.

Figura 20 - Tipos de retornos de escala de 100 DMUs (20 fazendas x cinco talhões), nas safras 2007 a 2011, Grupo 1.



Ainda a respeito do ano de 2007, 57% operaram com rendimentos crescentes – o que indica a necessidade de expandirem a produção, pois estão abaixo da escala ótima – e 37% das DMUs operaram com rendimentos decrescentes de escala ao mostrarem produção acima da escala ótima. Dessa forma, sugere-se aumentar a produtividade dos fatores de produção ou a eficiência tecnológica. Na última rebrota (ano de 2011), ao considerar retornos variáveis de escala, a grande maioria das DMUs (82%) mostraram retornos decrescentes de escala, enquanto 15% operaram com retornos crescentes de escala. Na média dos cinco ciclos, cerca de 8% das DMUs operaram com retornos constantes de escala – porém, destas, 5% foram eficientes, tendo em vista que elas foram simultaneamente eficientes no modelo de rendimentos constantes e no de rendimentos variáveis de escala, 41% operaram com retornos crescentes de escala e 51% com retornos decrescentes de escala.

Numa análise de fatores que poderiam ter influenciado no comportamento das DMUs que operaram em escala ótima de produção, constatou-se que, nestas, foram cultivadas as variedades RB855513, RB855536, RB835486 e RB867515. Nas DMUs F30T03 e F30T04 foram cultivadas as variedades RB855113 e RB855536. A fazenda 30 (F30) foi a que teve maior frequência de DMUs eficientes. A RB855113 é uma variedade de maturação média (colheita de julho a setembro), recomendada para ambientes de produção A1 a C2, conforme mostrado no Quadro 4, no qual é citada a alocação de variedades nos ambientes de produção e época de colheita. A RB855536 é uma variedade com época de colheita mais abrangente (de maio a setembro), sendo, portanto, uma variedade de maturação precoce a média, indicada para cultivos em ambientes de produção de B1 a C2. Assim, o ambiente C2 seria o limite inferior para cultivos dessas duas variedades.

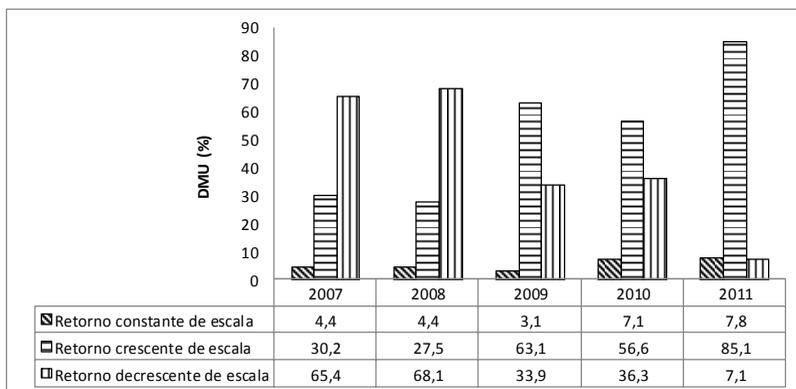
Analisando-se as DMUs que operaram com retornos constantes de escala e que foram eficientes, pode-se constatar que a RB835486 foi a variedade cultivada com mais frequência nessas DMUs, representando cerca de 40% do total. A RB835486 é uma variedade de maturação semelhante à RB855536, também indicada para ambientes de A1 a C2.

Nos ambientes de produção de A1 a C2, a capacidade de retenção de água nos solos é de média à alta e a fertilidade natural dos solos também é de média à alta (DEMATTÊ, 2005; PRADO, 2005; RIPOLI et al, 2007; SILVEIRA *et al.*, 2007). Assim, com base na alocação das variedades de cana, pode-se inferir que a grande maioria das DMUs eficientes foram de solos de alta capacidade de retenção e de

fornecimento de água e de nutrientes. Prado (2005) cita estudos de produtividade da cana-de-açúcar ao longo dos cortes, nos quais se observaram que as maiores produtividades e os menores decréscimos entre os cortes, ocorreram nos solos com maior capacidade de retenção e fornecimento de água e nutrientes. Oliveira *et al.*, (2013), em estudos com adubos verdes também reforçam o efeito do suprimento de água sobre o fluxo de nutrientes para a planta, bem como a maior eficiência nutricional e produtiva das plantas bem supridas em água.

Na Figura 21 são mostrados os tipos de retornos de escala das DMUs do Grupo 2. Observou-se que 4,4% das DMUs operaram com retornos constantes de escala, nos anos de 2007 e 2008. Em 2009, esse percentual situou-se em torno de 3%, cerca de 7% em 2010 e aproximadamente 8% em 2011. Nos dois primeiros anos, a grande maioria das DMUs operaram com retornos decrescentes de escala. Nos anos seguintes, a grande maioria operou com retornos crescentes de escala, com maior registro em 2011 (aproximadamente 85%).

Figura 21 - Tipos de retornos de escala de 295 DMUs (59 fazendas x cinco talhões), nas colheitas de 2007 a 2011, Grupo 2.



Na média dos cinco ciclos, cerca de 5% das DMUs operaram com retornos constantes de escala – porém, destas, 2% foram eficientes –, 53% com retornos crescentes de escala e 42% com retornos decrescentes de escala.

Ao analisar individualmente as DMUs, notou-se que houve destaque para a DMU F52T04, a qual operou em escala ótima de produção em quatro safras (cortes): primeira à quarta rebrotas. As

DMUs F13T05, F19T01, F29T04 e F34T05 foram destaque em dois cortes e as DMUs F06T01, F06T05, F13T04, F20T03, F21T01, F24T02, F24T04, F27T02, F36T03, F36T04, F36T05, F37T03, F51T01, F60T02, F72T04, F73T01 e F78T05, em apenas um corte.

Na DMU F52T04 foi cultivada a variedade RB855536, considerada a variedade com maior frequência de cultivo nas DMUs eficientes, visto que esta foi cultivada em cerca de 40% das DMUs consideradas eficientes. Segundo Idea News (2004); Prado (2005); Silveira *et al.*, (2007), essa variedade tem grande vigor de rebrota, tanto em sistemas de colheita de cana queimada quanto no sistema de cana colhida sem queima.

As outras duas variedades com maior frequência de cultivo, nas DMUs eficientes, foram a SP791011 e a RB867515. Estas se têm mostrado, na região das Serras dos Aimorés, mais tolerantes à seca, com maior estabilidade de produção. Conforme Demattê (2005); Prado (2005); Oliveira *et al.*, (2007); Raij (2011), a produção e a estabilidade do canavial têm sido influenciados por fatores do solo, do clima e da própria variedade da cana. Pois, conforme discutido anteriormente, para a região das Serras dos Aimorés, o volume e a distribuição das chuvas têm grande efeito no vigor das rebrotas e na produtividade dos canaviais. Dessa forma, analisando-se apenas a frequência do cultivo das variedades nas DMUs eficientes, ou seja, as que operaram em escala ótima de produção, pode-se constatar que o plantio de variedades mais tolerantes à seca foi uma variável com grande relação com a escala ótima de produção, uma vez que 78,55% destas DMUs foram plantadas com as variedades RB855536, RB867515 e SP791011.

Avaliando-se os resultados dos Grupos 1 e 2 com as variedades cultivadas, observou-se que a RB835486 não se destacou no Grupo 2, provavelmente, devido à sua maior exigência hídrica e nutricional, comparativamente à RB855536, RB867515 e SP791011, conforme citado em estudos de Dias *et al.*, (1999); Silveira *et al.*, (2007); Almeida *et al.*, (2008); Oliveira *et al.*, (2013).

Outra análise gerada pela abordagem DEA é a de *benchmarking*, onde se comparam as unidades entre si, identificando aquelas de melhor desempenho, que servirão como parceiras de excelência para as demais unidades não eficientes, uma vez que essas espelham o padrão de eficiência que deve ser almejado pelas organizações ineficientes. Esta referência varia conforme a aproximação dos níveis de utilização de insumos e produtos entre as fazendas, podendo variar de 0 a 1. A importância da DMU eficiente para as demais é tanto maior quanto mais

próximo de uma unidade. Na Tabela 13 estão apresentados os resultados da análise de *benchmark*, do Grupo 1, considerando as DMUs que são principais referências para as demais propriedades canavieiras, levando-se em conta o retorno variável de escala de produção.

Tabela 13 - Principais *benchmarks*, do Grupo 1, para as fazendas ineficientes no período de 2006 a 2011 (cana-planta à quarta rebrota da cana), considerando retorno variável de escala de produção.

Principal <i>benchmark</i> (DMU)	Cana-planta	1ª rebrota	2ª rebrota	3ª rebrota	4ª rebrota
	----- % -----				
F01T01	-	-	6	-	-
F01T02	-	14	29	-	-
F01T04	-	-	-	1	-
F02T02	-	-	1	-	-
F02T05	-	-	-	2	-
F05T03	-	-	2	-	-
F12T01	-	-	-	16	-
F12T04	28	-	-	-	-
F12T05	-	-	20	-	-
F14T05	-	-	-	10	-
F30T03	11	21	8	-	-
F30T04	-	-	16	18	95
F46T05	-	-	10	16	-
F47T02	-	-	-	-	5
F55T01	-	-	-	37	-
F62T02	-	-	8	-	-
F81T02	61	65	-	-	-

As fazendas F30T04 e F81T02 foram consideradas principais parceiras de excelência para maior número de fazendas ineficientes. A DMU F30T04 foi considerada principal *benchmark* para 16% das DMUs da segunda rebrota, para 18% da terceira rebrota e para 95% das DMUs da quarta rebrota e a DMU F81T02 foi a principal *benchmark* para 61% das DMUs da cana-planta e para 65% da primeira rebrota. Em 2009 (segunda rebrota) ocorreu maior número de DMUs principais modelos de excelência (nove DMUs) e, em 2011 (quarta rebrota) apenas duas foram principais parceiras de excelência, destacando-se a DMU F30T04 que foi modelo de excelência para maior número de DMUs ineficientes.

A DMU F81T02 teve alta produtividade no ciclo de cana-planta, com rendimento médio de 188,19 t de colmos industrializáveis por hectare. No ciclo de primeira rebrota, a produtividade dessa DMU foi de

130,41 t de colmos industrializáveis por hectare. Conforme citado no Capítulo 4, em uma das visitas técnicas realizadas pela autora às fazendas, pôde-se constatar que na fazenda 81 (F81) havia um gerenciamento muito bom das atividades de implantação e condução dos canaviais, pois, nas áreas de reforma dos canaviais, o solo estava calcareado, arado e gradeado. O produtor aguardava apenas uma chuva de maior volume (em torno de 30 mm) para iniciar a sulcagem do terreno e o plantio da cana. Observou-se que o produtor adota técnicas para aumentar o teor de matéria orgânica no solo, como adubação verde e adubação orgânica (vinhaça e resíduos da industrialização da cana, devido sua propriedade situar-se próximo à destilaria, aproximadamente 5 km).

O aumento do teor de matéria orgânica diminui a desagregação do solo, aumenta a taxa de infiltração de água da chuva, aumenta a capacidade de retenção de água no solo, com conseqüente aumento de disponibilidade hídrica para a planta. Nessa situação de maior disponibilidade hídrica, maior é o fluxo de nutrientes para o sistema radicular e para a parte aérea da planta, culminando em maior produtividade da lavoura e uso mais eficiente dos insumos, da terra e dos recursos humanos, conforme citado por Ruiz *et al.*, (1990); Orlando Filho *et al.*, (1993); Oliveira *et al.*, (2007); Raij (2011) e Oliveira *et al.*, (2013).

A DMU F30T04 foi a que teve maior produtividade na quarta-rebrota, dentre as que aplicaram vinhaça. Possivelmente, ocorreram chuvas localizadas após o corte da terceira rebrota, visto que o decréscimo de produtividade deste corte para o seguinte foi muito pequeno, apenas de 0,82 t/ha. Conforme discutido para a DMU F81T02, a disponibilidade hídrica após o corte tem grande influência no vigor e produção da rebrota.

De forma semelhante ao Grupo 1, na Tabela 14 estão apresentados os resultados da análise de *benchmark*, do Grupo 2.

No Grupo 2, ciclo de cana-planta, foram 10 DMUs consideradas principais parceiras de excelência para as DMUs ineficientes, com destaque para a DMU F37T03 que foi referência para maior percentual de DMUs (45,4%), seguida pela F73T01 com 27,8%. As demais DMUs situaram-se entre 11,5 e 0,3%.

Quanto às rebrotas da cana, o maior número de fazendas consideradas principais *benchmarks* ocorreu na quarta rebrota, com percentuais individuais de abrangência variando de 0,3% a 55,3%, com destaque para a DMU F51T01. Na segunda e terceira rebrotas, a DMU

F19T01 foi a principal *benchmark*, respectivamente 57,3% e 80%, para as DMUs ineficientes.

Tabela 14 - Principais *benchmarks*, do Grupo 2, para as fazendas ineficientes no período de 2006 a 2011 (cana-planta à quarta rebrota da cana), considerando retorno variável de escala de produção.

Principal <i>benchmark</i> (DMU)	Cana-planta	1ª rebrota	2ª rebrota	3ª rebrota	4ª rebrota
	%				
F06T01	–	1,7	–	–	–
F06T05	3,4	–	–	–	–
F13T04	–	4,1	–	–	–
F13T05	–	–	–	1,4	1,7
F17T02	–	–	–	0,3	–
F17T04	0,3	–	–	–	0,3
F18T02	0,3	–	–	–	–
F19T01	–	–	57,3	80,0	–
F20T03	–	–	–	12,9	–
F20T05	–	–	–	0,3	–
F21T01	–	8,8	–	–	–
F24T02	–	–	–	–	14,9
F24T04	–	–	10,8	–	0,7
F27T02	10,2	–	–	–	–
F29T03	–	–	–	–	0,3
F29T04	11,5	72,5	–	–	–
F32T02	–	–	–	–	0,3
F34T01	–	–	–	0,3	–
F34T02	0,3	–	–	–	–
F34T03	–	–	–	–	0,3
F34T05	–	–	8,1	0,3	4,1
F36T03	–	9,8	–	–	–
F36T05	–	–	–	4,1	–
F37T03	45,4	–	–	–	–
F45T03	0,3	–	–	–	–
F51T01	–	–	–	–	55,3
F52T04	–	0,3	23,7	–	3,1
F60T02	–	–	–	–	13,9
F60T04	–	–	–	–	0,3
F65T05	0,3	–	–	–	–
F72T04	–	–	–	–	4,7
F72T05	–	–	–	0,3	–
F73T01	27,8	–	–	–	–
F78T05	–	2,7	–	–	–

À semelhança das DMUs F30T04 e F81T02, os proprietários das DMUs F19T01, F29T04, F37T03 e F51T01 foram os que mais investiram na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Esses proprietários evitaram que houvesse compactação da área após o corte, acompanhando principalmente o trânsito de máquinas e de caminhões durante a colheita da cana. Tiveram também bom planejamento e execução nas atividades de adubação e controle de plantas daninhas. A associação destes fatores repercutiu em maior absorção de água pelo solo e maior eficiência nutricional e produtiva da cana, conforme descrito por Morelli *et al.*, (1987); Dias *et al.*, (1999); Andrade e Andrade (2007) e Almeida *et al.*, (2008).

Na avaliação de Kohlhepp (2008), a deficiência hídrica é um dos grandes problemas atuais do aumento da produtividade de colmos industrializáveis e de açúcares. Estudos realizados por Campos *et al.*, (2013), na usina Jales Machado, em Goiás, confirmaram o efeito de pequenas lâminas de irrigação, aplicadas após o corte sobre a produtividade do canavial. Esta usina é uma das que obtêm maior produtividade no Brasil. O clima da região é tropical com inverno seco e verões chuvosos, e, em média, a precipitação da região oscila em torno de 1.500 mm por ano. A maior deficiência hídrica ocorre entre os meses de maio a outubro. Campos *et al.*, (2013) realizaram a irrigação do canavial imediatamente após o corte da cana. O estudo foi instalado em blocos ao acaso com três repetições. Utilizaram-se cinco lâminas de reposição hídrica: zero, 20, 40, 60 e 80 mm. O aumento de produtividade de colmos foi linear em relação às lâminas de irrigação. A produtividade de colmos industrializáveis no tratamento que recebeu 80 mm de água foi 35% maior que a testemunha e, para a produção, observaram-se aumentos de 45%.

Estudos conduzidos na usina Triunfo, localizada em Boca da Mata, Alagoas, reforçam os resultados obtidos por Campos *et al.*, (2013). Nesse, foram aplicados 50 mm de água na lavoura, apenas uma vez. Houve efeito significativo desta irrigação sobre a área foliar, sobre plantas por m², acúmulo de matéria seca e produção de açúcar. A qualidade do caldo não foi alterada pela irrigação, assim, tanto os teores de sacarose quanto de açúcares redutores (mel) foram iguais no tratamento irrigado e não irrigado. O aumento de produção de açúcar recuperável (ATR) foi de 30% em média e deveu-se exclusivamente ao aumento da produção de colmos industrializáveis (informação pessoal, em 2014, do Sr. Manoel Gomes Pereira, gerente de pesquisa e desenvolvimento da usina).

Nesta seção, por meio dos modelos DEA/RCE e DE/RVE foram medidas as eficiências técnica e de escala de produção dos Grupos 1 e 2, para períodos individuais de tempo. Contudo, nos estudos de competitividade, considera-se importante avaliar as variações da eficiência produtiva ao longo do tempo. Essas variações nos processos de produção podem ser decorrentes de mudanças técnicas e, ou tecnológicas. Assim, na seção a seguir, utilizar-se-á a abordagem Índice de *Malmquist*.

5.3 MEDIDAS DE VARIAÇÕES DA EFICIÊNCIA, POR MEIO DO ÍNDICE DE *MALMQUIST*, DOS GRUPOS 1 E 2.

Para atender a um dos objetivos específicos deste estudo – o de avaliar as variações de eficiências técnicas e tecnológicas ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar –, utilizou-se o índice de Produtividade Total dos Fatores de produção (PTF), ou Índice de *Malmquist*. Com base em Färe *et al.*, (1994); Lovell (1996); Lovell (2003); Gomes e Dias (2004); Marinho e Carvalho (2004); Santos *et al.*, (2005); Marques e Silva (2006); Ferreira e Gomes (2009), por meio do programa *KonSi Malmquist Index*, foram calculadas e analisadas as variações da eficiência relativa em períodos de tempos diferentes (primeira à quarta rebrotas da cana), ou seja, foram determinadas e comparadas as eficiências entre o ano atual “t” e o ano base “t-1”.

As variáveis de *input* e *output* empregadas no cálculo dos escores de eficiência técnica e de escala foram também usadas para calcular as mudanças na PTF por meio do índice de *Malmquist*, relativas às rebrotas da cana. Desse modo, avaliaram-se os resultados dos cinco talhões de cana – por fazenda e entre fazendas –, ao longo do tempo (comparadas as colheitas do ano atual com as do ano anterior).

A decomposição do Índice de *Malmquist* é constituída pelas componentes (a) Variação na eficiência técnica global (ETG), (b) Variação na eficiência pura (EP), (c) Variação na escala de produção (EE) e (d) Variação tecnológica (ET). Para calcular esses índices, primeiramente obtiveram-se os resultados de eficiência relativa dos modelos com retornos constantes de escala (RCE) e com retornos variáveis de escala (RVE) nos tempos anterior e atual (neste estudo, fez-se a comparação entre as rebrotas da cana – anos de 2008 a 2011). Em seguida, com base nos resultados desses modelos, foram calculadas as variações da ETG, EP, EE e ET. De posse desses números-índice,

calculou-se o IPTF, que é o resultado da multiplicação entre ETG e ET.

Para mostrar essa operação, tomou-se como exemplo a Fazenda 1. Assim, na Tabela 15 estão apresentados os resultados das variações das eficiências técnicas no tempo “t” em relação ao tempo “t-1”, das cinco DMUs que compuseram essa fazenda.

Tabela 15 - Eficiência técnica nos modelos RCE e RVE, da Fazenda 1, na rebrota dos cinco talhões, nos tempos anterior e atual da colheita da cana-de-açúcar.

DMU (Fazenda 1)	Comparação entre a colheita do ano base com a do ano anterior (t, t-1)	RCE(t)	RCE(t-1)	RCEM ₁ (t,t-1)	RCEM ₂ (t-1,t)	RVE(t)	RVE(t-1)
F01T01	2009_2008	1,000	0,762	0,969	5,384	1,000	0,766
F01T01	2010_2009	0,897	1,000	1,000	1,030	0,953	1,000
F01T01	2011_2010	0,791	0,897	0,825	0,860	0,929	0,953
F01T02	2009_2008	1,000	1,000	0,855	9,422	1,000	1,000
F01T02	2010_2009	0,997	1,000	0,924	1,122	1,000	1,000
F01T02	2011_2010	0,817	0,997	0,836	1,005	1,000	1,000
F01T03	2009_2008	0,887	0,921	0,774	6,484	0,900	0,926
F01T03	2010_2009	0,847	0,887	0,922	0,814	0,856	0,900
F01T03	2011_2010	0,780	0,847	0,799	0,826	0,813	0,856
F01T04	2009_2008	0,911	0,986	0,796	6,966	0,938	1,000
F01T04	2010_2009	1,000	0,911	0,993	0,837	1,000	0,938
F01T04	2011_2010	0,725	1,000	0,751	0,965	0,738	1,000
F01T05	2009_2008	0,952	0,899	0,865	8,361	0,986	0,924
F01T05	2010_2009	0,901	0,952	0,981	1,026	0,925	0,986
F01T05	2011_2010	0,758	0,901	0,777	0,879	0,759	0,925

Descrição dos índices:

RCE (t-1): Eficiência de retorno constante de escala no momento base em relação à fronteira base.

RCE (t): Eficiência de retorno constante de escala no momento atual em relação à nova fronteira.

RCEM₁ (t, t-1): Eficiência de retorno constante de escala no momento atual em relação à fronteira base.

RCEM₂ (t-1, t): Eficiência de retorno constante de escala no momento base em relação à nova fronteira.

RVE (t-1): Retorno variável de escala de produção nos tempos anterior (t-1) e atual (t).

RVE (t): Eficiência de retorno variável de escala no momento atual em relação à nova fronteira.

Ao analisar os cinco talhões da Fazenda 1, modelo RCE, foram observados os seguintes comportamentos: a DMU F01T01 foi considerada ineficiente em 2008 e eficiente na rebrota seguinte, porém, tornando-se ineficiente nas duas últimas rebrotas. A DMU F01T02 foi eficiente em 2008 e 2009, e em 2010 e 2011 perdeu eficiência. As DMUs F01T03 e F01T05 foram consideradas ineficientes em todas as rebrotas da cana, enquanto a F01T04 foi ineficiente em 2008 e 2009, eficiente em 2010 e novamente ineficiente em 2011. As DMUs eficientes no modelo RCE também o foram no modelo RVE. Além dessas, no tempo “t-1” e “t”, as DMUs F01T02 e F01T04, consideradas ineficientes no modelo RCE, foram eficientes no modelo RVE. Assim, considerando-se a eficiência de retorno constante de escala no momento

atual em relação à nova fronteira, três DMUs foram relativamente eficientes (segunda rebrota das F01T01 e F01T02 e terceira rebrota da F01T04). Considerando a eficiência de retorno variável de escala no momento atual em relação à nova fronteira cinco DMUs foram relativamente eficientes (segunda rebrota das F01T01 e F01T02; terceira rebrota das DMUs F01T02 e F01T04 e quarta rebrota da DMU F01T02).

Com base na Tabela 15, foram calculadas as variações da ETG, EP, EE e ET, conforme se observa na Tabela 16.

Tabela 16 - Índices de variação da PTF, da variação das eficiências técnica, pura, tecnológica e de escala de produção entre as rebrotas dos cinco talhões de cana da Fazenda 1, comparando-se o ano atual (t) com o anterior (t-1).

DMU (Fazenda 1)	Comparação entre a colheita do ano base com a do ano anterior (t, t-1)	ΔIPTF		ΔETG	ΔEP	ΔEE		ΔET
		ETG°ET	EP°EE	RV(t)/RV(t-1)	ETG/EP ou [(RC(t)/RC(t-1)] /[RV(t)/RV(t-1)]	Raiz quadrada de [(RCMΔl(t,t-1)/RC(t)) /[RC(t-1)/RCMΔ2(t-1,t)]]		
F01T01	2009_2008	0,486	1,312	1,305	1,005		0,370	
F01T01	2010_2009	0,933	0,897	0,953	0,941		1,040	
F01T01	2011_2010	0,920	0,882	0,974	0,905		1,043	
F01T02	2009_2008	0,301	1,000	1,000	1,000		0,301	
F01T02	2010_2009	0,906	0,997	1,000	0,997		0,909	
F01T02	2011_2010	0,826	0,819	1,000	0,819		1,008	
F01T03	2009_2008	0,339	0,963	0,972	0,991		0,352	
F01T03	2010_2009	1,040	0,955	0,951	1,005		1,089	
F01T03	2011_2010	0,944	0,921	0,950	0,969		1,024	
F01T04	2009_2008	0,325	0,924	0,938	0,985		0,352	
F01T04	2010_2009	1,141	1,097	1,066	1,030		1,040	
F01T04	2011_2010	0,751	0,725	0,738	0,982		1,036	
F01T05	2009_2008	0,331	1,058	1,067	0,991		0,313	
F01T05	2010_2009	0,951	0,947	0,938	1,009		1,005	
F01T05	2011_2010	0,862	0,842	0,820	1,026		1,024	

Descrição dos índices:
 ΔIPTF: Variação no Índice de produtividade total dos fatores (Índice de *Malmquist*)
 ΔETG: Variação na eficiência técnica global
 ΔEP: Variação na eficiência pura
 ΔEE: Variação na eficiência de escala de produção
 ΔET: Variação na eficiência tecnológica

Verifica-se que entre 2008 a 2011, a Fazenda 1 apresentou perdas de produtividade em cerca de 87% dos talhões de cana, contribuindo para um resultado médio de 0,737 de IPTF, ou seja, perda acumulada em torno de 26% nas rebrotas da cana. Apenas os talhões (ou DMUs) F01T03 e F01T04 tiveram ganhos de produtividade da ordem de 4 e 14%, respectivamente, no ano de 2010 comparativamente ao de 2009.

Observa-se que o ganho de produtividade da DMU F01T03 foi atribuído às variações tecnológicas em 2010, uma vez que esta unidade teve perda de eficiência (regresso técnico) nesse período. Já o incremento de produtividade da DMU F01T04, nessa mesma época,

pode ser explicado pelas variações positivas, tanto na eficiência técnica quanto na tecnológica.

Em relação às variações na eficiência técnica, nota-se que três DMUs tiveram progresso técnico (com destaque para a DMU F01T01 com 31,2%), uma DMU permaneceu constante e 11 tiveram regresso técnico. Em termos de variação tecnológica, nove DMUs tiveram progresso tecnológico e as demais, regresso tecnológico. Marinho e Carvalho (2004), ao compararem a produtividade na agricultura brasileira no período de 1970 a 1995, por meio do Índice de *Malmquist*, observaram que os ganhos de produtividade decorreram-se, quase exclusivamente, de variações tecnológicas, uma vez que as variações técnicas foram muito pequenas. Estes autores ressaltaram que, na Região Sudeste do Brasil, a variação tecnológica foi de aproximadamente 53%, enquanto o ganho de eficiência foi de apenas 1,2%.

Na Tabela 17 são mostrados os sumários das medidas descritivas das variáveis que compuseram o IPTF do Grupo 1.

Tabela 17 - Índices de variação da produtividade total dos fatores, das eficiências técnica, pura, de escala e tecnológica entre as rebrotas da cana-de-açúcar do Grupo 1.

Tempos t; t-1	Estatística descritiva	Δ IPTF	Δ ETG	Δ EP	Δ EE	Δ ET	RCE (t-1)	RCE (t)	RCEM _{k1} (t,t-1)	RCEM _{k2} (t-1,t)	RVE (t-1)	RVE (t)
2009-2008	Média	0,34	1,13	1,08	1,05	0,30	0,76	0,85	0,70	6,96	0,82	0,87
	Desvio-padrão	0,04	0,14	0,12	0,08	0,02	0,11	0,11	0,11	1,03	0,12	0,11
	CV (%)	13,2	12,4	11,0	7,9	7,6	14,2	12,4	15,6	14,7	14,4	12,1
	Mínimo	0,24	0,85	0,86	0,86	0,27	0,51	0,51	0,41	4,74	0,52	0,52
	Máximo	0,50	1,66	1,65	1,58	0,37	1,00	1,00	0,98	9,86	1,00	1,00
	Amplitude	0,27	0,81	0,79	0,72	0,10	0,49	0,49	0,56	5,11	0,48	0,48
	Mediana	0,33	1,11	1,06	1,02	0,29	0,77	0,87	0,71	6,91	0,81	0,89
2010-2009	Média	0,93	0,96	0,97	0,99	0,97	0,85	0,81	0,80	0,89	0,87	0,85
	Desvio-padrão	0,11	0,12	0,12	0,04	0,06	0,11	0,12	0,13	0,12	0,11	0,13
	CV (%)	11,3	12,7	12,4	4,4	6,4	12,4	14,4	15,8	13,2	12,1	14,9
	Mínimo	0,66	0,66	0,66	0,80	0,90	0,51	0,55	0,54	0,56	0,52	0,56
	Máximo	1,30	1,43	1,41	1,09	1,13	1,00	1,00	1,19	1,15	1,00	1,00
	Amplitude	0,64	0,77	0,75	0,28	0,23	0,49	0,45	0,65	0,59	0,48	0,44
	Mediana	0,93	0,97	1,00	1,00	0,94	0,87	0,82	0,82	0,90	0,89	0,86
2011-2010	Média	0,93	0,94	0,96	0,97	1,00	0,81	0,76	0,76	0,82	0,85	0,81
	Desvio-padrão	0,12	0,12	0,13	0,06	0,03	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14
	CV (%)	13,1	12,6	13,9	6,2	3,3	14,4	15,6	15,5	15,2	14,9	17,5
	Mínimo	0,68	0,69	0,70	0,78	0,95	0,55	0,49	0,48	0,56	0,56	0,51
	Máximo	1,30	1,28	1,31	1,17	1,06	1,00	1,00	1,06	1,05	1,00	1,00
	Amplitude	0,61	0,59	0,61	0,39	0,11	0,45	0,51	0,58	0,49	0,44	0,49
	Mediana	0,93	0,94	0,97	0,98	1,00	0,82	0,76	0,77	0,83	0,86	0,80

Ao analisar a Tabela 17, quanto à variação na eficiência técnica global (ETG), percebeu-se que ocorreram situações de progresso e

regresso técnico nas DMUs do Grupo 1 no decorrer dos ciclos, com destaque para o ano de 2009, com aumento médio de 13% na eficiência técnica global. Nesse período, o número-índice máximo foi de 1,66; isto significa que a DMU F05T05 (a quem se refere o índice) teve 66% de progresso técnico no ano de 2009 em comparação com o de 2008. Em relação às mudanças tecnológicas, constatou-se regresso em todas as DMUs no ciclo de 2009, com baixos números-índice de variação de ET (entre 0,27 e 0,37). No decorrer das rebrotas seguintes, esse grupo de DMUs teve progresso técnico e tecnológico. Porém, na média, tais progressos não foram suficientes para compensar a queda na PTF. Percebeu-se que as perdas na PTF ocorreram mais em razão do regresso tecnológico do que o da eficiência técnica, uma vez que, nesse grupo de fazendas, a média dos números-índice de eficiência tecnológica foi de 0,757 (enquanto a média de variação na eficiência técnica foi de 1,005); isto significa perda de aproximadamente 24% na ET e ganho de 0,5% na ETG, ao comparar os ciclos das rebrotas da cana.

Na Tabela 18 são mostrados os sumários das medidas descritivas das variáveis que compuseram o IPTF do Grupo 2.

Tabela 18 - Índices de variação da produtividade total dos fatores, das eficiências técnica, pura, de escala e tecnológica entre as rebrotas da cana-de-açúcar do Grupo 2.

Tempos t, t-1	Estatística descritiva	Δ IPTF	Δ ETG	Δ EP	Δ EE	Δ ET	RCE (t-1)	RCE (t)	RCEM ₁ (t,t-1)	RCEM ₂ (t-1,t)	RVE (t-1)	RVE (t)
2009-2008	Média	0,33	0,99	0,98	1,01	0,33	0,76	0,75	0,70	6,35	0,79	0,77
	Desvio-padrão	0,04	0,12	0,12	0,05	0,02	0,10	0,11	0,10	0,91	0,11	0,11
	CV (%)	11,6	12,3	12,1	4,6	4,8	13,1	14,4	14,4	14,4	13,5	14,7
	Mínimo	0,23	0,63	0,59	0,84	0,31	0,48	0,44	0,42	3,92	0,49	0,47
	Máximo	0,46	1,43	1,37	1,29	0,38	1,00	1,00	1,01	9,12	1,00	1,00
	Amplitude	0,24	0,81	0,78	0,45	0,07	0,52	0,56	0,58	5,20	0,51	0,53
	Mediana	0,33	1,00	0,98	1,01	0,33	0,75	0,75	0,70	6,38	0,78	0,77
2010-2009	Média	0,92	1,02	1,01	1,01	0,90	0,75	0,76	0,70	0,85	0,77	0,78
	Desvio-padrão	0,12	0,12	0,12	0,04	0,05	0,11	0,14	0,15	0,13	0,11	0,14
	CV (%)	13,5	11,9	11,6	3,9	5,3	14,4	18,2	21,8	15,2	14,7	17,8
	Mínimo	0,48	0,53	0,55	0,65	0,82	0,44	0,42	0,38	0,50	0,47	0,44
	Máximo	1,96	1,61	1,60	1,24	1,22	1,00	1,00	1,68	1,22	1,00	1,00
	Amplitude	1,48	1,08	1,05	0,59	0,40	0,56	0,58	1,30	0,72	0,53	0,56
	Mediana	0,93	1,03	1,02	1,01	0,89	0,75	0,77	0,68	0,85	0,77	0,78
2011-2010	Média	0,91	0,97	0,97	1,00	0,94	0,76	0,74	0,69	0,81	0,78	0,76
	Desvio-padrão	0,09	0,10	0,09	0,04	0,02	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14	0,15
	CV (%)	10,0	10,0	9,7	3,6	1,7	18,2	20,4	20,9	17,9	17,8	19,7
	Mínimo	0,58	0,63	0,63	0,78	0,78	0,42	0,35	0,33	0,45	0,44	0,40
	Máximo	1,24	1,34	1,33	1,18	0,97	1,00	1,00	0,97	1,28	1,00	1,00
	Amplitude	0,65	0,71	0,70	0,40	0,19	0,58	0,65	0,64	0,83	0,56	0,60
	Mediana	0,92	0,98	0,98	1,00	0,94	0,77	0,75	0,70	0,81	0,78	0,76

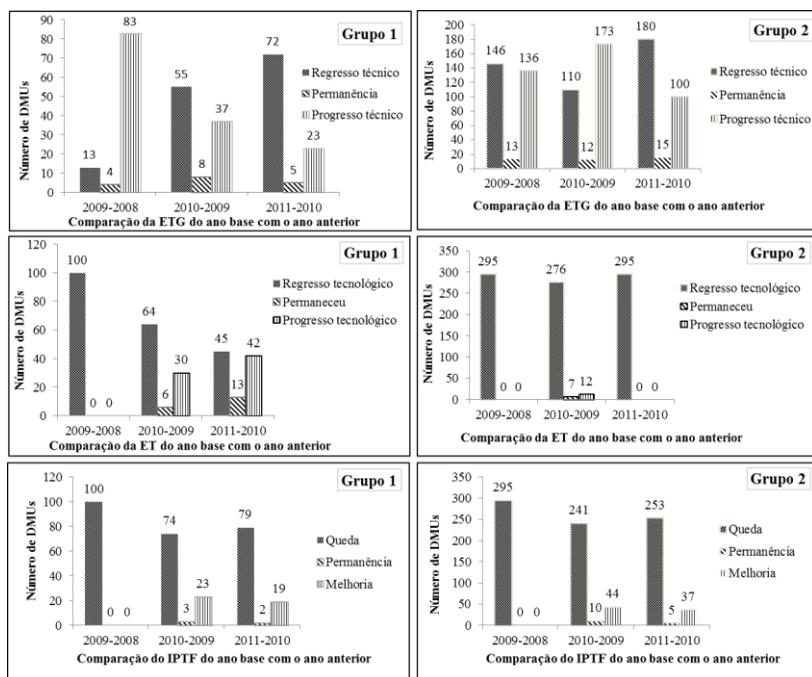
Na Tabela 18, ao analisar as duas composições do Índice de *Malmquist* (eficiência técnica global e eficiência tecnológica) na média por ciclo, percebe-se que houve progresso e regresso técnicos das fazendas do Grupo 2. Porém, na média por grupo, o número-índice situou-se em torno de 0,993; isto significa que houve perda de eficiência (0,7%) no decorrer das rebrotas. Ao avaliar os valores máximos das variações tecnológicas, observou-se progresso tecnológico apenas no ano de 2010. Neste ano, destacou-se a DMU F13T01 com progresso técnico de 61%, progresso tecnológico de 22% e, conseqüentemente, ganho de PTF de 96%. Ao analisar a escala de produção dessa DMU, verificou-se que ela operou em escala ótima de produção. Os piores regressos tecnológicos ocorreram na safra de 2009 (100% das DMUs), ao compará-la com a safra de 2008.

Quanto às rebrotas da cana do Grupo 2, constatou-se que, na média dos ciclos, as perdas na PTF (27%) ocorreram mais em razão do regresso tecnológico (27%) que da eficiência técnica (1%). Quanto à variação na escala de produção, em média, estas fazendas operaram com rendimentos decrescentes de escala, o que significa que estas DMUs poderão melhorar a tecnologia, aumentando, portanto, a produtividade dos fatores de produção.

Na Figura 22 estão descritos o desempenho técnico, tecnológico e da produtividade total dos fatores das 20 fazendas (100 DMUs) do Grupo 1 e das 59 fazendas (295 DMUs) do Grupo 2.

Comparando as variações das eficiências dos tempos atual e anterior, pode-se categorizar o estudo das DMUs dos Grupos 1 e 2 em três subgrupos distintos: DMUs que tiveram progresso, DMUs que tiveram regresso e DMUs que não sofreram alteração no ciclo das rebrotas da cana-de-açúcar. Pela Figura 22, observa-se que o maior percentual de regresso técnico ocorreu em 2011 (última rebrota), tanto no Grupo 1 quanto no Grupo 2, respectivamente com 72 e 61%. Os maiores progressos técnicos foram registrados, no Grupo 1, em 2009 (cerca de 83% das DMUs) e no Grupo 2, em 2010 (cerca de 59%). Em relação à mudança tecnológica, no ano de 2009, houve regresso em 100% das DMUs do Grupo 1, e no Grupo 2 houve 100% de regresso nos anos de 2009 e de 2011. Desse modo, esses resultados influenciaram na variação da PTF em ambos os grupos.

Figura 22 - Desempenho técnico, tecnológico e da PTF dos Grupos 1 e 2.



Ganhos de eficiência no Índice de *Malmquist* implicam deslocamentos no sentido da fronteira tecnológica entre os pontos considerados no tempo. Caso não tenha havido regressão tecnológica, melhor eficiência técnica na produção permite às fazendas ou DMUs ganho na produtividade total. Conforme Ferreira e Gomes (2009), são necessárias três condições para identificar quais unidades de produção estão deslocando a fronteira tecnológica (efeito *frontier shift*) entre dois períodos de tempo (“t-1” e “t”):

- A primeira condição é que haja mudança tecnológica;
- A segunda condição é que, se o produto da unidade de produção no período “t” for superior ao máximo produto potencial que poderia ser obtido no período “t-1”, utilizando-se as mesmas quantidades de fatores de produção do período “t”, haverá progresso tecnológico, e, assim, a unidade de produção poderá estar deslocando a fronteira de produção;
- A terceira condição indica que, se houver deslocamento da fronteira de produção, a unidade de produção deve estar situada

sobre ela. Assim, para que uma DMU seja responsável pelo deslocamento da fronteira, é necessário que se satisfaçam às condições expressas nas equações (1), (2) e (3), no Capítulo 2.

Para identificar quais unidades de produção deslocaram a fronteira tecnológica (efeito *frontier shift*) do período anterior para o período atual, foram calculadas as distâncias para as DMUs dos Grupos 1 e 2. Na Tabela 19, são mostrados os cálculos das distâncias por programação linear para as DMUs do Grupo 1 que contribuíram, em algum momento, para o deslocamento da fronteira de produção.

Tabela 19 - Distâncias calculadas por programação linear das unidades analisadas, mudanças na eficiência técnica (ETG), mudança tecnológica (ET) e na produtividade total dos fatores (IPTF) para um conjunto de DMUs do Grupo 1 que contribuíram, em algum momento, para o deslocamento da fronteira de produção.

Comparação entre o ano atual e o ano base	DMU	$d_o^{t-1}(x_{t-1}, y_{t-1})$	$d_o^t(x_t, y_t)$	$d_o^{t-1}(x_t, y_t)$	$d_o^t(x_{t-1}, y_{t-1})$	ETG	ET	IPTF
		(a)	(b)	(c)	(d)			
2009_2008	F02T05	0,80	0,90	0,87	5,92	1,13	0,36	0,41
	F12T01	0,84	1,00	0,91	7,58	1,19	0,32	0,38
	F30T04	0,96	1,00	0,98	7,38	1,04	0,36	0,37
	F47T02	0,59	0,68	0,56	5,85	1,14	0,29	0,33
2010_2009	F02T05	0,90	1,00	1,01	0,89	1,11	1,01	1,12
	F12T01	1,00	1,00	1,09	1,07	1,00	1,01	1,01
	F30T04	1,00	1,00	1,19	1,15	1,00	1,02	1,02
	F47T02	0,68	0,79	0,86	0,72	1,17	1,01	1,18
2011_2010	F02T05	1,00	0,75	0,78	1,00	0,75	1,02	0,76
	F12T01	1,00	0,85	0,87	0,98	0,85	1,02	0,87
	F30T04	1,00	1,00	1,06	0,94	1,00	1,06	1,06
	F47T02	0,79	1,00	1,04	0,78	1,26	1,03	1,30

Para satisfazer às condições expressas nas equações (2) e (3), mencionadas no item 2.2.6, do Capítulo 2, é necessário que a distância localizada na coluna (b) da Tabela 19 seja igual à unidade e a distância expressa na coluna “c”, desta tabela, seja maior que a unidade. Conforme Chinellato Neto (2003), se houver deslocamento da fronteira de produção, a unidade de produção deve estar sobre ela, e que o produto da unidade de produção no período “t” deva ser superior ao máximo produto potencial que poderia ser obtido no período “t-1”, utilizando-se os fatores de produção do período “t”. Assim, para verificar as condições descritas nas equações (2) e (3) é necessário observar os dados exibidos na Tabela 19. Nesta tabela, os números-índice, exibidos nas três últimas colunas, representam, respectivamente,

a variação das eficiências técnica, tecnológica e a produtividade total dos fatores de produção.

Dentre as unidades do Grupo 1, as que, em algum momento, tiveram progresso técnico, progresso tecnológico e ganhos em produtividade total dos fatores de produção foram apenas as DMUs F02T05, F12T01, F30T04 e F47T02.

Em 2009, nenhuma DMU atendeu às condições de deslocamento da fronteira, pois os números-índice da terceira coluna foram inferiores a uma unidade e os da quarta coluna, menores ou iguais à unidade. No entanto, em 2010, houve deslocamento da fronteira provocado pelas DMUs F02T05, F12T01 e F30T04, uma vez que estas DMUs tiveram progresso técnico (valores da coluna “b” > que os valores da coluna “a”) e tecnológico (valores da coluna “b”=1 e valores da coluna “c” > que 1) nesse período. Em 2011, esse deslocamento foi provocado apenas pelas DMUs F30T04 e F47T02.

A DMU F02T05 apresentou aumento de 11% na eficiência técnica e de apenas 1% na eficiência tecnológica, assim, o aumento no IPTF foi de 12%. O deslocamento da fronteira possivelmente tenha sido ocasionado por fatores exógenos não captados pelo modelo, por exemplo, chuvas localizadas, uma vez que se manteve a quantidade de insumos aplicados – especialmente a adubação orgânica, na dose de 20 m³ por hectare –, e houve acréscimo na produtividade de 6,78 t de colmos industrializáveis por hectare. Conforme Oliveira *et al.*, (2007), essas chuvas localizadas, especialmente quando ocorrem após adubação e cultivo da entrelinha da rebrota, têm grande efeito no vigor das rebrotas e no desenvolvimento da lavoura. O solo da região tem, em média, capacidade máxima de retenção de água de 20% (um litro de solo retém 0,2 L de água), assim, chuvas de 20 mm são suficientes para umedecer, até a capacidade máxima de retenção de água, um perfil de 10 cm de profundidade. Esse umedecimento assegura umidade suficiente para uma rebrota vigorosa.

Em 2009, o talhão 1 da Fazenda 12 (DMU F12T01) destacou-se com 19% de aumento no progresso técnico; porém, nesse período, ocorreu perda de tecnologia (cerca de 68%) e, como consequência, houve redução na produtividade de 62%. Em 2010, o IPTF desta DMU aumentou em 1%, devido à eficiência tecnológica. Nesse ano, a aplicação de adubo orgânico foi reduzida de 40 m³ para 30 m³, ou seja, um decréscimo de 25%. Entretanto, a redução na produtividade foi de apenas 10%, o que, numa avaliação anual, de curto prazo, aumentou a eficiência do uso dos insumos, especialmente da adubação. Esse efeito

de redução na adubação não acompanhada de igual redução na produtividade deve ser avaliado com cautela, pois há comprometimento da fertilidade do solo, devido ao balanço negativo de nutrientes (a quantidade de nutrientes exportada pela colheita é maior que a reposta pela adubação), pois, conforme alertam Demattê (2005), Malavolta *et al.*, (2007); Oliveira *et al.*, (2007); Raij (2011), há necessidade de recompor a fertilidade do solo, sob pena de comprometer a vida útil do canavial e a lucratividade da cultura.

Na DMU F30T04, verificou-se aumento de 2% na eficiência tecnológica em 2010 comparativamente ao de 2009, mas não houve perda nem ganho técnico. Comparando 2011 com 2010, observou-se incremento na produtividade de 6,3%; porém, a eficiência técnica manteve-se, devido ao uso de insumos na mesma quantidade, especialmente da vinhaça que foi aplicada na dose de 30 m³ por hectare. O aumento no IPTF decorreu-se da eficiência tecnológica, possivelmente associada a fatores climáticos, mais notadamente às chuvas localizadas, conforme citado para a DMU F02T05.

Na DMU F47T02 ocorreu aumento da eficiência técnica em 17% e de apenas 1% na eficiência tecnológica, em 2010 comparativamente a 2009. A dose de adubo orgânico foi reduzida em 25%, mas houve aumento da produtividade. A variedade de cana empregada na DMU F47T02 foi a RB835486, a qual é colhida do início a meados de safra, conforme descrito no Quadro 4. Essa variedade responde muito bem à aplicação de água após o corte, assim, novamente a ocorrência de chuvas localizadas pode ter sido uma das causas do aumento da eficiência técnica. Conforme informação dos técnicos da DASA, é bastante comum, na região, a ocorrência de chuvas localizadas no período de safra. Observou-se aumento de 30% no IPTF, quando se comparou o ano de 2011 com o de 2010. Nessa comparação, o aumento da eficiência técnica foi de 26%. Esse aumento deve estar associado à redução na adubação, que foi de 33%, mas resultou em decréscimo de produtividade da cultura de apenas 6%.

Em 2010 e 2011, houve destaque para a DMU F47T02 com ganhos de 17% em ETG; 1% em ET e 18% em IPTF (em 2010) e, respectivamente, de 26, 3 e 30% (em 2011). Entretanto, mesmo contribuindo para o deslocamento da fronteira em algumas safras de cana, essas DMUs, na média dos três anos, tiveram regresso tecnológico, e estes progressos técnicos não foram suficientes para fazer com que estas não tivessem perdas de produtividade, que, na média dos ciclos das rebrotas, foram de 24% (DMU F02T05); 25% (DMU

F12T01); 18% (DMU F30T04); e 6% (DMU F47T02).

As DMUs do Grupo 2 que, em algum momento, tiveram, progresso técnico, progresso tecnológico e ganhos em produtividade total dos fatores de produção e, portanto, contribuíram para haver deslocamento da fronteira, foram F13T01, F13T05, F20T03 e F36T05 (Tabela 20).

Tabela 20 - Distâncias calculadas por programação linear das unidades analisadas, mudanças na eficiência técnica (ETG), mudança tecnológica (ET) e na produtividade total dos fatores (IPTF) para um conjunto de DMUs do Grupo 2 que contribuíram, em algum momento, para o deslocamento da fronteira de produção.

Comparação entre o ano atual e o ano base		DMU	$d_o^{t-1}(x_{t-1}, y_{t-1})$	$d_o^t(x_t, y_t)$	$d_o^{t-1}(x_t, y_t)$	$d_o^t(x_{t-1}, y_{t-1})$	ETG	ET	IPTF
			(a)	(b)	(c)	(d)			
2009_2008	F13T01		0,79	0,62	0,60	5,49	0,79	0,37	0,29
	F13T05		0,86	0,75	0,71	6,68	0,88	0,35	0,31
	F20T03		0,86	0,99	0,95	6,31	1,16	0,36	0,42
	F36T05		0,73	0,91	0,82	6,52	1,23	0,32	0,39
2010_2009	F13T01		0,62	1,00	1,68	0,70	1,61	1,22	1,96
	F13T05		0,75	1,00	1,36	0,86	1,33	1,09	1,45
	F20T03		0,99	1,00	1,00	0,99	1,01	1,00	1,01
	F36T05		0,91	1,00	1,03	1,06	1,10	0,94	1,03
2011_2010	F13T01		1,00	0,78	0,61	1,28	0,78	0,78	0,61
	F13T05		1,00	1,00	0,97	1,03	1,00	0,97	0,97
	F20T03		1,00	0,75	0,69	1,10	0,75	0,91	0,69
	F36T05		1,00	0,94	0,88	1,07	0,94	0,93	0,88

Conforme aconteceu no Grupo 1, em 2009, nenhuma DMU do Grupo 2 atendeu às condições de deslocamento da fronteira. Em 2010, houve deslocamento da fronteira provocado pelas DMUs F13T01, F13T05 e F36T05 e, em 2011, não houve deslocamento da fronteira de produção, uma vez que todas as DMUs tiveram regresso tecnológico.

Verificou-se que os talhões 1 e 5 da Fazenda 13 tiveram os maiores índices de ETG, ET e IPTF em relação às demais DMUs, com destaque para o talhão 1 (DMU F13T01) que obteve, em 2010, 61% de progresso técnico, 22% de progresso tecnológico e 96% de ganho de produtividade em relação a 2009. Esse aumento da eficiência foi causado pela ausência de adubação na terceira e quarta rebrotas. Conforme citado, esse aumento da eficiência causado pela ausência de adubação deve ser avaliado com cautela, pois há comprometimento da fertilidade do solo, devido ao balanço negativo de nutrientes, visto que, na colheita do ano seguinte (2011), esta DMU apresentou regresso técnico e tecnológico de 22%, com consequente perda de produtividade

da ordem de 39%.

Na DMU F13T05 constatou-se eficiência tecnológica de 9% e técnica de 33% em 2010, relativamente ao ano de 2009, e que também esteve associada à ausência de adubação na terceira e quarta rebrotas. Nesta DMU, em 2011 comparativamente ao ano anterior, ainda que tenha mantido a mesma eficiência técnica do ano anterior, houve ineficiência tecnológica e perda de produtividade de 3%.

Outra DMU do grupo de fazendas adubadas quimicamente, que contribuiu para o deslocamento da fronteira, foi a DMU F20T03. Nesta, as rebrotas foram adubadas apenas com 250 kg de fertilizante. Com base nos números-índice, detectou-se aumento de eficiência técnica de 1%, sem alteração na eficiência tecnológica. Esses resultados de pequeno deslocamento precisam ser avaliados de forma cautelosa, pois, nesta DMU, no ano de 2010, comparativamente ao de 2009, houve aumento de produção de apenas 680 kg de colmos industrializáveis por hectare, o que, na prática, é difícil quantificar com precisão, pois representa aumento percentual de apenas 0,75%. Há necessidade de a cana estar com pouquíssima variabilidade dentro do talhão, para que a amplitude dos valores que compõem a média seja muito baixa e as perdas na colheita também, de um ano para outro, serem muito pequenas.

A quarta e última DMU do Grupo 2 que contribuiu para o deslocamento da fronteira foi a DMU F36T05. Nesta DMU, houve aumento de eficiência técnica de 10% no ano de 2010 em relação a 2009, que esteve associada à redução no uso de herbicida, sem redução equivalente na produtividade. O herbicida foi uma das variáveis selecionadas para compor o quadro de *inputs*. Entretanto, conforme Oliveira *et al.*, (2013), a dosagem do herbicida é influenciada pelo histórico de infestação ou controle de plantas daninhas no ciclo anterior. As condições hídricas do solo (solo seco ou úmido) também influenciam na dosagem. Geralmente, quando o solo está seco e dependendo do percentual de degradação do herbicida pelo sol, por segurança, recomenda-se aumentar a dose do produto. Assim, a redução ou aumento da dose pode estar associado ao manejo da cultura e disponibilidade hídrica do solo.

À semelhança do Grupo 1, as DMUs do Grupo 2 que contribuíram para o deslocamento da fronteira em algumas safras de cana, na média dos três anos da rebrota do canavial, tiveram regresso tecnológico, e os progressos técnicos destas, também, não foram suficientes para fazer com que não tivessem perdas de produtividade, que, na média dos ciclos das rebrotas, obtiveram IPTF da ordem de 9%

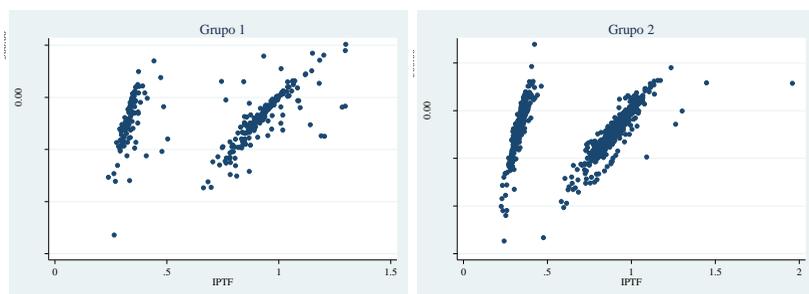
(DMU F13T05); 29% (DMU F20T03); e 23% (DMU F36T05).

Nos estudos de Coelli e Rao (2003), em que avaliaram o crescimento da PTF de produção na agricultura de 93 países, no período de 1980-2000, usando Índice de *Malmquist*, 78% dos países tiveram progresso tecnológico, 20% regresso tecnológico e 2% mantiveram-se inalterados. Em relação à mudança na eficiência técnica, 47% tiveram progresso, 14% regresso e 39% permaneceram inalterados. O Brasil apresentou apenas 0,1% de mudança na eficiência técnica e 1,9% de mudança na eficiência tecnológica.

No caso específico das propriedades canavieiras da Serra dos Aimorés, a produtividade da região é alta e, em lavouras com alta produtividade, incrementos de produção são mais difíceis de serem obtidos, uma vez que há necessidade de grande equilíbrio entre todos os fatores de produção. Por exemplo, um aumento na dose de adubação em uma lavoura de alta produtividade, tem menor impacto ou impacto negativo, enquanto em uma lavoura de baixa produtividade, esse impacto sobre a produtividade é, na grande maioria das vezes, positivo.

Com o propósito de comparar o IPTF com o lucro das 79 fazendas desse estudo, fez-se uma análise de regressão das seguintes variáveis: variação do lucro entre as rebrotas da cana (variável dependente) e o IPTF (variável independente). Na Figura 23 estão dispostos os resultados dessa análise.

Figura 23 - Análise de regressão das variáveis IPTF e variação do lucro referentes às DMUs dos Grupos 1 e 2.

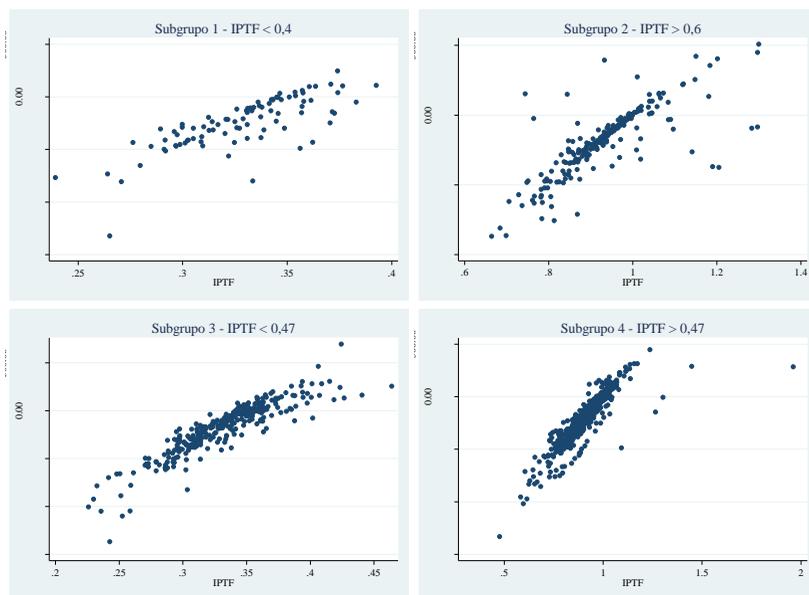


Observa-se que as DMUs do Grupo 1 e as do Grupo 2 encontram-se subdivididas em dois distintos subgrupos. Assim, cada Grupo foi desmembrado em dois subgrupos.

Os subgrupos 1 e 2, compostos pelas propriedades do Grupo 1,

corresponderam às DMUS com IPTF menores que 0,4 e maiores que 0,6, respectivamente. Os subgrupos 3 e 4 corresponderam às propriedades do Grupo 2, cujas DMUS apresentaram IPTF menores que 0,47 e maiores que 0,47, respectivamente. Nos diagramas de dispersão, apresentados na Figura 24, mostram-se a relação entre a variação no lucro e o IPTF, relativos aos Grupos 1 e 2.

Figura 24 - Análise de regressão das variáveis IPTF e variação do lucro referentes às DMUs dos subgrupos 1 e 2 e dos subgrupos 3 e 4.



Ao analisar o IPTF de cada DMU, observou-se que os menores índices (subgrupos 1 e 3) referiam-se ao ano de 2009 (segunda rebrota da cana) quando comparados aos de 2008 (primeira rebrota da cana). Nesse período, houve regresso tecnológico em 100% das DMUs, em ambos os subgrupos, ainda que tenha havido progresso técnico em 83% das DMUs do subgrupo 1 e em 47% das DMUs do subgrupo 2. As maiores reduções de produtividade de colmos industrializáveis ocorreram nos primeiros ciclos (Tabela 5). Considerado os ciclos das rebrotas, na média dos dois grupos, os percentuais de queda foram de 12; 10; e 9,5%, respectivamente, entre a primeira, segunda, terceira e quarta rebrotas. Possivelmente, essa foi uma das possíveis causas da maior concentração em 2009 de DMUs, com menores índices de PTF,

uma vez que essa queda foi mais acentuada no ciclo da primeira rebrota (2008) em relação à segunda (2009).

Na Tabela 21, estão evidenciados os resultados da análise de regressão das variáveis IPTF e lucro dos quatro subgrupos.

No subgrupo 1, as DMUs que tiveram IPTF inferiores a 0,4 podem ser representadas pela equação:

$$“\Delta \text{ Lucro} = -2.360 + 6.437 * \text{IPTF}”.$$

Isso significa que para cada 0,1 de aumento no Índice de *Malmquist* há acréscimo de R\$643,71 no lucro. Enquanto no subgrupo 2 (DMUs com IPTF superiores a 0,6), aumento de 0,1 no Índice de *Malmquist* ocasiona incremento de R\$166,42 no lucro.

Tabela 21 - Análise de regressão das variáveis IPTF e lucro dos quatro subgrupos que constituíram as DMUs dos Grupos 1 e 2.

Grupo 1	Subgrupo 1: DMUs com IPTF < 0,4				
	Varição no lucro (y) e IPTF (x) (R\$/talhão)		Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	Intercepto (constante)		-2.360	182	0,000
	IPTF em número-índice		6.437	554	0,000
	Número de observações: 92				
	Coefficiente de determinação (R ²): 0,5999				
	Subgrupo 2: DMUs com IPTF > 0,6				
	Varição no lucro (y) e IPTF (x) (R\$/talhão)		Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	Intercepto (constante)		-1.741	89	0,000
	IPTF em número-índice		1.664	95	0,000
Número de observações: 200					
Coefficiente de determinação (R ²): 0,6037					
Grupo 2	Subgrupo 3: DMUs com IPTF < 0,47				
	Varição no lucro (y) e IPTF (x) (R\$/talhão)		Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	Intercepto (constante)		-2.306	59	0,000
	IPTF em número-índice		6.401	178	0,000
	Número de observações: 295				
	Coefficiente de determinação (R ²): 0,8146				
	Subgrupo 4: DMUs com IPTF > 0,47				
	Varição no lucro (y) e IPTF (x) (R\$/talhão)		Coefficiente estimado	Erro-padrão	P> t
	Intercepto (constante)		-1.790	38	0,000
	IPTF em número-índice		1.743	41	0,000
Número de observações: 590					
Coefficiente de determinação (R ²): 0,7481					

No subgrupo 3, as DMUs com números índice de *Malmquist* inferiores a 0,47 são representadas pela equação:

$$\Delta \text{ Lucro} = -2.306 + 6.401 * \text{IPTF}''.$$

Nesta equação, observa-se que, para cada 0,1 de aumento no IPTF haverá acréscimo de R\$640,10 no lucro, enquanto no subgrupo 4 (DMUs com números índice de *Malmquist* superiores a 0,47), para cada 0,1 de acréscimo no IPTF haverá um incremento de R\$174,30 no lucro.

Os maiores aumentos do lucro, tanto no subgrupo 1 quanto no subgrupo 3, podem ser explicados pela lei dos incrementos decrescentes ou acréscimos não proporcionais proposta por *Mitscherlich*, no início dos anos 1900, em que o incremento de produção associado à cada adição crescente de insumos é menor que o incremento anterior (MALAVOLTA *et al.*, 1997; RAIJ, 2011) ou, ainda que exista aumentos na produção, com o acréscimo de insumos ou fatores de produção, esse aumento não é proporcional.

Em médio prazo, cerca de seis anos ou um ciclo completo da cultura (do plantio ao novo plantio), os subgrupos 1 e 3 podem apresentar maior lucro, devido ao menor investimento em insumos, mas, a longo prazo, essa prática de redução no uso de insumos irá comprometer a fertilidade do solo e a produtividade da cultura. Outras possíveis causas dos maiores aumentos do lucro, nos subgrupos 1 e 3, podem ter sido em função dos fatores exógenos não incluídos no modelo, como: características do solo, topografia, gerenciamento técnico, manejo da cultura etc.

Em uma das visitas técnicas realizadas na região de Serra dos Aimorés, alguns produtores mais observadores mostraram, pela análise de solos, que houve redução na fertilidade do solo, devido às adubações com menos fertilizantes. A redução na adubação das lavouras de cana-de-açúcar é uma estratégia emergencial proposta por alguns pesquisadores quando o preço da cana-de-açúcar diminui, mas esses alertam para a necessidade de recompor a fertilidade do solo após a crise financeira (DEMATTE, 2005, MALAVOLTA *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2007; RAIJ, 2011), sob pena de comprometer a vida útil do canavial e a lucratividade da cultura.

No Grupo 1, dentre as DMUs que contribuíram para o deslocamento da fronteira de produção, a que mais se destacou, em termos financeiros, foi a DMU F02T05 (safra 2010 em comparação com a de 2009), uma vez que esta teve incremento de 53,34% no lucro. No Grupo 2, foram as DMUs F13T01 e F13T05, respectivamente, com aumento de 177 e 51,46% de lucro relativo à safra de 2010 em comparação com a de 2009.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção, são apresentadas as conclusões, as limitações do trabalho, as sugestões para futuras pesquisas e as publicações decorrentes deste estudo.

6.1 CONCLUSÕES

Delineou-se, inicialmente, neste trabalho, sobre o objeto de estudo composto pelas propriedades canavicultoras da região da Serra dos Aimorés. A relevância socioeconômica e ambiental do setor motivou a proposta de verificar o desempenho das propriedades canavicultoras do ponto de vista do critério da eficiência produtiva.

Para atender à proposta, o estudo fundamentou-se nas bases conceituais de eficiência. Nessa base literária, percebeu-se que estudos relacionados à DEA e a Índices de *Malmquist* eram ainda incipientes no setor sucroenergético, principalmente os relativos à produção de cana-de-açúcar. Ante o ineditismo da pesquisa, nesse estudo objetivou-se avaliar a eficiência relativa das propriedades canavicultoras utilizando-se as abordagens DEA e Índice de *Malmquist*.

Em situações particulares, para atender aos dois primeiros objetivos específicos, foram caracterizados os principais insumos relativos à implantação, condução e colheita de um canavial e, por meio dos pesos resultantes das análises de correlação e dos componentes principais das variáveis de *input* e *output* de um sistema de produção de cana, foram definidas as seguintes variáveis: “área do canavial, calcário, adubo químico ou orgânico, herbicida e inseticida químico” e “colmos industrializáveis de cana-de-açúcar”.

Em razão de as propriedades canavicultoras terem tipos diferentes de adubos aplicados nas rebrotas da cana, esse estudo foi dividido em dois grupos: O Grupo 1, composto por 20 fazendas que aplicaram adubo orgânico nas rebrotas e, o Grupo 2, formado por 59 fazendas que usaram adubo químico nas rebrotas. Com o propósito de apresentar as variáveis, foram realizadas análises descritivas e de regressão dos *inputs* e do *output*. Por esse procedimento, pode-se constatar que o valor médio de

produtividade e o coeficiente de variação foram semelhantes entre os dois grupos. Entretanto, a maior e a menor produtividade foram observadas nas fazendas que utilizaram adubo químico. Nas fazendas que usaram adubo orgânico (vinhaça), a amplitude de variação na produtividade foi de 70,8 t de colmos por hectare, enquanto no Grupo 2 essa amplitude foi de 101,44 t de colmos por hectare. Vários fatores podem ter contribuído para esses resultados, mas, a aplicação de vinhaça após o corte da cana, contribuiu para maior vigor das rebrotas. Além disso, a vinhaça melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, devido especialmente à sua matéria orgânica, e, maior teor de matéria orgânica no solo, resulta em maior capacidade de retenção da água da chuva, com impacto direto na produtividade da lavoura. Contudo, o uso da vinhaça na fertilização dos canaviais fica restrito às áreas mais próximas aos dutos que levam esse resíduo aquoso para o campo. O transporte da vinhaça para longas distâncias é economicamente inviável.

Os decréscimos médios de produtividade da cana-planta à quarta rebrota foram, para o Grupo 1, de 20,1; 11; 7,4; e 7,3 t e, para o Grupo 2, de 16,2; 9,9; 9,2; e 6,4 toneladas. Observou-se que os maiores decréscimos de produtividade ocorreram da cana-planta para a primeira rebrota, com cerca de 18%, no primeiro grupo 1, e 15%, no segundo grupo. Dentre outros fatores, o fator de produção, que, isoladamente pode causar maior queda na produtividade de uma lavoura de cana-de-açúcar, é a disponibilidade de água no solo, necessária em maior quantidade na fase de crescimento da planta.

Considerando que o aumento da matéria orgânica no solo aumenta a capacidade de retenção da água da chuva no terreno, deve-se recomendar práticas que contribuam para o aumento da matéria orgânica no solo. Uma dessas práticas é a adubação verde com *crotalaria juncea*, que apresenta alto potencial produtivo na região. Vários produtores têm conseguido implantar a *crotalaria juncea* nas áreas de reforma dos canaviais, com bons resultados tanto na produtividade da cana-planta e primeira rebrota quanto na redução de produtividade entre os ciclos. Entretanto, a implantação da *crotalaria juncea* com sucesso nas áreas de reforma dos canaviais está ligada, dentre outros fatores, ao maior teor de água disponível na camada arável do solo, por ocasião da semeadura, uma vez que esse adubo verde é extremamente sensível à deficiência hídrica na fase inicial de crescimento, quando seu sistema radicular ainda é muito superficial. A autora pôde constatar, em uma das suas visitas técnicas, que semeaduras

realizadas em solo bem preparado (corrigidos quanto à acidez e subsolados), não foram bem sucedidas, pois, as sementes germinaram e, logo depois, morreram em razão de pequena estiagem após a germinação.

Ao realizar avaliações econômicas, verificou-se que o ponto de equilíbrio, em t de colmos, foi cerca de 50 t/ha, para o Grupo 1, e em torno de 62 t/ha, para o Grupo 2. Devem ter contribuído para esses resultados a menor amplitude na produtividade do Grupo 1, associado aos efeitos benéficos da aplicação de vinhaça. Esses resultados reforçam a necessidade de implementação de práticas adequadas que possibilitem maior enraizamento da cana-de-açúcar, para que a cultura, explorando maior volume de solo, utilize, de forma mais eficaz, os insumos e a água da chuva. Conforme citado inicialmente, a disponibilidade de água no solo é o fator que isoladamente mais limita e causa oscilações na produção da cana-de-açúcar na região da Serra dos Aimorés.

Houve relação positiva entre a produtividade da lavoura e o lucro. Assim, todas as medidas que possam ser tomadas, desde o sincronismo entre o planejamento das atividades de preparo do solo e plantio da cana, seguido de práticas culturais adequadas e realizadas no momento correto, poderão aumentar a lucratividade da lavoura. A atenção a detalhes do cronograma e do gerenciamento das atividades poderão resultar em aumento da captura da luz solar e do uso da água da chuva pela cana, com reflexos na eficiência produtiva do sistema.

Para atender ao terceiro objetivo específico, verificou-se, por meio da Análise Envoltória de Dados que, em média, 8,2% das unidades observadas tiveram desempenho ruim, enquanto 38% obtiveram desempenho ótimo quanto ao uso de insumos no sistema de produção de cana, do Grupo 1. Dessa forma, várias fazendas podem ser utilizadas como locais de divulgação de tecnologia, principalmente para os produtores formadores de opinião. A apresentação dos resultados dessas fazendas em reuniões e dias de campo constituem um meio muito eficiente de divulgação de tecnologias geradas ou adaptadas à Serra dos Aimorés.

Na média dos cinco ciclos, cerca de 8% das DMUs, do Grupo 1, operaram com retornos constantes de escala, 41% sobre retornos crescentes de escala e 51% com retornos decrescentes de escala. Enquanto, no Grupo 2, em torno de 5% das DMUs operaram com retornos constantes de escala, 53% com retornos crescentes de escala e 42% com retornos decrescentes de escala. O que indica, em algumas DMUs, a necessidade de expandirem a produção e, em outras,

aumentarem a produtividade dos fatores de produção. Ademais, foram identificadas as DMUs principais parceiras de excelência para as DMUs consideradas ineficientes.

No quarto objetivo específico propôs-se avaliar as variações de eficiências técnicas e tecnológicas ao longo dos ciclos da cultura da cana-de-açúcar, utilizando *Malmquist*. Comparando as variações das eficiências dos tempos atual e anterior, pode-se categorizar o estudo das DMUs dos Grupos 1 e 2 em três subgrupos distintos: as que tiveram progresso, as que tiveram regresso e as que não sofreram alteração no ciclo das rebrotas da cana-de-açúcar. Observou-se que o maior percentual de regresso técnico ocorreu em 2011 (última rebrota), tanto no Grupo 1 quanto no Grupo 2, respectivamente com 72 e 61%. Em relação à mudança tecnológica, no ano de 2009, houve regresso em 100% das DMUs do Grupo 1, e, no Grupo 2, 100% de regresso nos anos de 2009 e de 2011. Desse modo, esses resultados influenciaram na variação da PTF em ambos os grupos, uma vez que apenas 14,3% das unidades observadas no Grupo 1 e 10% das do Grupo 2 tiveram ganhos no IPTF.

Ao comparar o IPTF com o lucro das 79 fazendas, observou-se que em ambos os grupos podem-se estabelecer dois subgrupos com desempenhos diferentes. Dessa forma, há necessidade contínua de aprimoramento das técnicas e dos sistemas de produção. Para tanto, as ferramentas da Engenharia de Produção podem ser úteis na aplicação de técnicas de gerenciamento que proporcionem execução controlada de cada etapa do processo, para otimizar o uso dos recursos, extraindo destes o máximo benefício ao longo do maior tempo possível, considerando a sustentabilidade socioeconômica e ambiental do sistema.

Ante ao exposto, constata-se que as abordagens Análise Envoltória de Dados e Índice de Produtividade de *Malmquist* constituem-se como alternativa e complemento aos modelos econométricos, em situações em que os preços de mercado não são conhecidos ou os valores relativos são de difícil mensuração. Estas abordagens podem ser utilizadas para avaliar o desempenho relativo de propriedades canavicultoras considerando-se os aspectos multidimensionais inerentes à produção de cana-de-açúcar. O uso da Engenharia de Produção em atividades do agronegócio, com base em técnicas e modelos de engenharia, é fundamental para gerenciar as funções, garantir o atendimento dos padrões da qualidade nos resultados, avaliar com eficiência os resultados, bem como otimizar o uso dos recursos e propor melhorias em todo o sistema produtivo.

Assim, vale ressaltar que as abordagens DEA e *Malmquist* foram fundamentais para alinhar as atividades realizadas neste estudo e que podem ser utilizadas com sucesso no âmbito do agronegócio.

Por fim, a contribuição deste estudo foi permitir avaliar a eficiência relativa de fazendas de cana-de-açúcar por meio das abordagens DEA e Índice de *Malmquist* e que poderá se constituir em subsídio às decisões dos gestores, visando aumentar a produtividade da cultura.

6.2 LIMITAÇÕES E DIFICULDADES NA CONDUÇÃO DO ESTUDO

O estudo foi conduzido em uma região de alto potencial produtivo, devido principalmente à radiação solar. Em anos de boa distribuição de chuvas, a produtividade de cana-de-açúcar de várias lavouras é igual ou supera as mais produtivas do Brasil. Entretanto, na maioria dos anos avaliados, a disponibilidade de água no solo, possivelmente, foi o fator que isoladamente mais limitou e causou oscilações na produtividade das 79 fazendas avaliadas.

Durante o período de estudo, a precipitação pluvial foi bastante irregular, tanto em volume anual como mensal. Em função dessa irregularidade das chuvas, pôde-se constatar que os produtores que tiveram sincronismo entre o planejamento e a execução das atividades conseguiram implantar os melhores canaviais e, conseqüentemente, suas lavouras de cana-de-açúcar foram as mais lucrativas e com menores decréscimos de produtividade entre ciclos.

Devido à extensão da área das 79 fazendas, o estudo foi muito abrangente, e alguns refinamentos, principalmente quanto à exata precipitação pluvial que ocorreu em cada talhão (DMU), não puderam ser realizados. Conforme citado, para se ter a exata precipitação pluvial que ocorreu em cada talhão, essas chuvas localizadas somente poderiam ser medidas se houvesse em cada DMU uma estação climatológica automatizada, o que é inviável devido ao custo do equipamento e possibilidade de roubo ou avaria.

Comparativamente aos estudos conduzidos em parcelas experimentais, com condições extremamente controladas, esta pesquisa apresenta limitações – por não ter tido condições de incluir, no modelo, as variáveis: características do solo, topografia, condições climáticas e hídricas, gerenciamento técnico, manejo da cultura etc. –, mas, por outro

lado, este estudo representa o somatório de inúmeras variáveis que influenciam a produção da cana-de-açúcar em grandes áreas.

A pesquisa foi conduzida em um grande número de DMUs e, se por um lado aumentou-se o número de observações, por outro não foi possível refinar ainda mais as informações. Algumas informações repassadas pelo Educampo-Cana foram conferidas pela autora nas visitas técnicas realizadas às fazendas, mas, devido ao grande número de DMUs, não foi possível realizar uma visita mais detalhada a cada uma delas para buscar explicação ou ter maior entendimento de determinadas causas e efeitos. Por exemplo: Por quê e determinada DMU teve proporcionalmente menor decréscimo na rebrota do que outra? Quais foram os fatores responsáveis pelo menor decréscimo de produção? Foram fatores ligados à época de colheita, ao trânsito de máquinas, às chuvas localizadas após o corte da cana? Ou foram causadas por associação de efeitos gerenciais, do solo e do clima? Essas perguntas, às vezes, não puderam ser respondidas.

Nas discussões anteriores (Revisão de Literatura e Resultados e Discussão) foram abordadas as variabilidades existentes tanto na distribuição e volume de chuvas quanto na capacidade de retenção de água dos solos das DMUs estudadas. Para a região das Serras dos Aimorés, a disponibilidade hídrica é um dos fatores que mais limita a produtividade e a eficiência dos insumos, principalmente a adubação. Conforme citado anteriormente, a área total abrangida pelo estudo foi grande e foram tomados os valores de precipitação pluvial ocorridos na destilaria, o que não representou exatamente a chuva ocorrida em cada DMU.

A cana-de-açúcar, uma cultura semiperene, apresenta efeito residual fisiológico para o volume de chuvas, disponibilidade hídrica e de nutrientes ocorridos nos ciclos anteriores. Para culturas anuais como milho e soja, o efeito é apenas ligado ao solo. Entretanto, para a cana-de-açúcar, o vigor das rebrotas e, conseqüentemente, o desenvolvimento e produtividade são influenciados por muitas outras variáveis. Nesse aspecto, a característica da cultura de ser semiperene, também se constitui em fator que dificultou precisar causas e efeitos que afetaram a produtividade e a eficiência das DMUs.

6.3 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS DE PESQUISA

Considerando que a disponibilidade hídrica é, isoladamente, o fator que mais limita e que causa oscilação na produtividade, estudos

para minimizar a restrição hídrica podem ser realizados para aumentar a eficácia da utilização da água da chuva, avaliando-se seus efeitos sobre a produtividade, vida útil do canal e lucratividade da cultura. Assim, seria interessante avaliar a eficiência produtiva de sistemas de produção de cana associando-se o bagaço de cana à adubação química, tanto da cana-planta quanto das rebrotas. Outras duas linhas de pesquisa também focadas no aumento da disponibilidade de água para a cultura seriam “competição de adubos verdes e plantas de coberturas, visando elevar o teor de matéria orgânica do solo e melhorar suas propriedades físicas, químicas e biológicas” e “irrigação da cana-de-açúcar após a colheita, em áreas de adubação química, visando aumentar o vigor das rebrotas e a vida útil dos canaviais”.

Sugerem-se incluir, nos estudos futuros, as variáveis não controláveis que não foram contempladas nesta pesquisa, com enfoque prospectivo e com maior detalhamento da eficiência de cada unidade que compõe o sistema de produção ou cada unidade tomadora de decisão.

6.4 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTA PESQUISA

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; BORNIA, A. C.; SILVEIRA, S.F.R.; DRUMOND, A. M.; OLIVEIRA, M. W. Análise de custos e eficiência de fazendas produtoras de cana-de-açúcar por meio da Análise Envoltória de Dados. Custos e @gronegocio on line. www.custoseagronegocioonline.com.br. 2014.

FRIES, C. E; OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; BORNIA, A.C. On Productivity Measurement of Sugarcane Cultivation in Brazil. 25th POMS, 2014, Atlanta. Anais of 25th POMS, 2014 (abstract). Link: POMS, 2014.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; BORNIA, A. C.; OLIVEIRA, M. W. Competitividade técnica e econômico-financeira como estratégia para assegurar a responsabilidade social da cultura da cana-de-açúcar. In: Responsabilidad Social de las Organizaciones (RSO): Panorama de la agenda académica de América Latina. Norma Gorrochatechi; Oscar Licandro y Valmir Martins (Orgs). Universidad de Buenos Aires. 2013.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; BORNIA, A. C.; SILVEIRA, S.

F. R.; DRUMOND, A. M.; OLIVEIRA, M. W. Eficiência de fazendas produtoras de cana-de-açúcar por meio da Análise Envoltória de Dados. In: XIII Congresso Internacional de Custos, 2013. Portugal. Anais do XIII Congresso Internacional de Custos. Porto: Portugal: OTOC, 2013. v. 1. p. 1-21.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; BORNIA, A. C.; OLIVEIRA, M. W. Productive potencial of green manures aiming rotation with sugarcane, in Alagoas State. In: 4th International Workshop Advances in Cleaner Production, 2013, São Paulo. 4th International Workshop Advances in Cleaner Production: Integrating Cleaner Production into Sustainability Strategies. São Paulo, SP: UNIP, 2013. v. 1. p. 1-10.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; BORNIA, A. C.; OLIVEIRA, M. W. Gestão do conhecimento na produção de cana-de-açúcar. In: XIII SEPROSUL - Semana de la Ingeniería de Producción Sudamericana, 2013, Gramado, Rio Grande do Sul. Semana de la Ingeniería de Producción Sudamericana. Gramado, RS: UFRGS, 2013. v. 1. p. 1-9.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; BORNIA, A. C.; FRIES, C. E.; OLIVEIRA, M. W. Gestão de custos em fazendas canavieiras como vantagem competitiva. In: XIII Fórum Internacional de Administração e IX Congresso Mundial de Administração, 2013, Gramado, Rio Grande do Sul. XIII Fórum Internacional de Administração e IX Congresso Mundial de Administração, 2013. v. 1. p. 1-14.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; BORNIA, A. C.; FRIES, C. E.; OLIVEIRA, M. W. Utilização de DEA (Data Envelopment Analysis) para determinar a eficiência técnica em propriedades canavieiras. In: XIII Fórum Internacional de Administração e IX Congresso Mundial de Administração, 2013, Gramado, Rio Grande do Sul. XIII Fórum Internacional de Administração e IX Congresso Mundial de Administração, 2013. v. 1. p. 1-16.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; SELIG, P.M.; BARBOSA, V.M.; CAMPOS, L.M.S.; BORNIA, A.C.; OLIVEIRA, M. W. Tecnologia e custos de produção de cana-de-açúcar: um estudo de caso em uma propriedade agrícola. <www.lajbm.net/> (Latin American Journal of Business Management, 2012).

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; BORNIA, A. C.; OLIVEIRA, M. W. Competitividade técnica e econômico-financeira como estratégia para assegurar a responsabilidade social da cultura da cana-de-açúcar. In: II Simpósio de Responsabilidade Social das Organizações (SIRSO): Rumo à consolidação de diretrizes estratégicas para América Latina, 2012, Rio de Janeiro. II SIRSO. Rio de Janeiro: UFRJ, 2012. v. 1. p. 1-15.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; BORNIA, A. C.; SILVEIRA, S. F. R.; OLIVEIRA, M. W.; DRUMOND, A. M. The production efficiency in sugarcane farms. In: 10th International Conference on DEA, 2012, Natal. Data Envelopment Analysis: theory and applications: Proceedings of the 10th International Conference on DEA. Natal, RN: DEA, 2012. v. 1. p. 307-316.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; SELIG, P. M.; BORNIA, A. C.; OLIVEIRA, M. W. Produtividade: Importante fator para obtenção de lucro nas empresas agrícolas. In: VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão: Sustentabilidade Organizacional no Contexto da Rio+20, 2012, Niterói, RJ. VIII CNEG. Rio de Janeiro: UFRJ, 2012. v. 1. p. 1-14.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; SELIG, P. M.; CAMPOS, L. M. S.; OLIVEIRA, M. W. Eficiência na indústria sucroalcooleira em função da variável época de colheita da cana-de-açúcar no alinhamento da ecoeficiência. In: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção-ENEGEP, 2011, Belo Horizonte, MG. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção-ENEGEP, 2011.

OLIVEIRA, Terezinha Bezerra Albino; SELIG, P. M.; CAMPOS, L. M. S.; OLIVEIRA, M. W.; ARISTIDES, E.V.S. A adubação verde com *Crotalaria juncea* por ocasião da reforma do canavial aumenta a produtividade e diminui os custos de produção. VIII Congresso Latinoamericano de Sociologia Rural- ALASRU 2010, 2010, Porto de Galinhas. www.alasru.org; VIII Congresso Latinoamericano de Sociologia Rural, 2010.

REFERÊNCIAS

ADHIKARI, C. B.; BJORN DAL, T. Analyses of technical efficiency using SDF and DEA models: Evidence from Nepalese agriculture. **Applied Economics**, v. 44, n. 25, p. 3297-3308, 2012.

AFONSO, M. H. F; SOUZA, J. V. ENSSLIN, S. R; ENSSLIN, L. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo PROKNOW-C na busca de literatura sobre avaliação do desempenho sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental – RGSA**, São Paulo, v.5, n. 2, p.47-62, maio/ago. 2011.

AFTAB, M. *et al.* The impact of bank efficiency on share performance: Evidence from Pakistan. **African Journal of Business Management**, v. 5, n. 10, p. 3975-3980, 2011.

AGE/MAPA - Assessoria de Gestão Estratégica/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio: Brasil 2012/13 a 2022/23**. Projeções de longo prazo. Biblioteca Nacional de Agricultura – BINAGRI. Brasília, DF. 4ª edição. Junho, 2013.

ALBUQUERQUE, F. M. **Processo de fabricação do açúcar**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2009. 275 p.

ALI, J.; SINGH, S. P.; EKANEM, E. Efficiency and productivity changes in the indian food processing industry: Determinants and policy implications. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 12, n. 1, p. 43-66, 2009.

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.5, p 1441-1448. 2008.

AMADO, C. A. F. *et al.* Integrating the Data Envelopment Analysis and

the Balanced Scorecard approaches for enhanced performance assessment. **Omega**, v. 40, n. 3, p. 390-403, 2012.

AMATO NETO, J. (Org.). **Sustentabilidade & produção**: teoria e prática para uma gestão sustentável. São Paulo: Atlas. 245 p. 2011.

AMORIM, H. V, LOPES, M. L, OLIVEIRA, J.V.C.O, BUCKERIDGE M.S, GOLDMAN G.H. Scientific challenges of bioethanol production in Brazil. **Appl Microbiol Biotechnol** . v. 91, p. 1267–1275, 2011.

ANDRADE, L. A. B.; ANDRADE, P. P. Implantação e condução de canaviais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 44-54, 2007.

ÂNGULO-MEZA, L.; BIONDI NETO, L.; RIBEIRO, P. G. SIAD - Sistema Integrado de apoio à Decisão v.2.0: uma implementação computacional de modelo de análise envoltória de dados e um método multicritério. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 37, 2005, Gramado. **Anais...** Gramado, 2005.

ÂNGULO-MEZA, L; ESTELITA. LINS, M. P. Review of methods for increasing discrimination in Data Envelopment Analysis. **Annals of operations research**. New Jersey/USA, v. 116, p. 225-242, 2002.

ÂNGULO-MEZA, L.; SANTOS, F. R. Modelos DEA com variáveis não controláveis na avaliação de veículos do segmento B. **Sistemas & Gestão**, v. 2, p. 248-256, 2007.

ANJOS, M. A. **Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) no estudo da eficiência econômica da indústria têxtil brasileira nos anos 90**. 2005. 239 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis, 2005.

ARAÚJO, M. J. **Fundamentos de Agronegócios**. 2 ed. São Paulo: Atlas S.A., 2007. 157 p.

ARMAGAN, G.; NIZAM, S. Productivity and efficiency scores of dairy farms: The case of Turkey. **Quality and Quantity**, v. 46, n. 1, p. 351-358, 2012.

BALSADI, O. O mercado de trabalho assalariado na cultura da cana-de-açúcar. Dossiê Ethanol. **Revista Eletrônica da SBPC**, n. 86. 2007.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.

BANKER, R. D.; NATARAJAN, R. Evaluating contextual variables affecting productivity using Data Envelopment Analysis. **Operations Research**. v. 56, n. 1, p. 48-58, January–February 2008.

BARBETTA, P.A.; REIS, M.M.; BORNIA, A.C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 410p.

BARROS, T.D; RAMOS, T.G.; SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; ANGULO-MEZA, L. Avaliação dos atrasos em transporte aéreo com um modelo DEA. **Produção** (São Paulo. Impresso), v. 20, p. 601-611, 2010.

BATALHA, M. O. As cadeias de produção agroindustriais: uma perspectiva para o estudo das inovações tecnológicas. **Revista de Administração**. São Paulo, v. 30, n. 4, p.43-50, out/dez. 1995.

BATALHA, M.O.; BUAINAIN, A. M.; SOUZA FILHO, H. M. **Tecnologia de gestão e agricultura familiar**. Disponível em: <<http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/2005>>. Acesso em 23 mar. 2012.

BATALHA, M.O.; SILVA, A.L. Redesenhando tecnologias de gestão no contexto das cadeias agroindustriais. In: MONTOYA, M. A e PARRÉ, J. L. (Coord.). **O agronegócio brasileiro no final do Século XX: estrutura produtiva, arquitetura organizacional e tendências**. v.1. Passo Fundo: UPF, p. 183-216, 2000.

BEGUM, I. A. *et al.* Contract farmer and poultry farm efficiency in Bangladesh: a data envelopment analysis. **Applied Economics**, v. 44, n. 28, p. 3737-3747, 2012.

BELLONI, J. A. **Uma metodologia de avaliação de eficiência**

produtiva de Universidades Federais Brasileiras. 2000. 245f. Tese (Doutorado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis, 2000.

BIO, S. R. **Sistemas de informação:** um enfoque gerencial. São Paulo: Atlas, 1996.183 p.

BORGES, R.S Confrontando avaliações: exame nacional de cursos e análise envoltória de dados. **Revista Intersaberes.** v. 1, n. 2, p. 259 – 271, jul-dez 2006.

BORNIA, A.C. **Análise gerencial de custos:** aplicação em empresas modernas. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

BOZOĞLU, M. *et al.* Evaluation of different trout farming systems and some policy issues in the Black Sea region, Turkey. **Journal of Applied Sciences**, v. 6, n. 14, p. 2882-2888, 2007.

BRAGATO, I. R.; SIQUEIRA, E. S.; GRAZIANO, G.; SPERS, E. E. Produção de açúcar e álcool vs. responsabilidade social corporativa: as ações desenvolvidas pelas usinas de cana-de-açúcar frente às externalidades negativas. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 15, n. 1, p. 89-100, jan.-abr. 2008.

BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p.300-308, jan./abr. 2006.

BRESSAN, V. G.; BRESSAN, A. A.; LIMA, J. E.; BRAGA, M. J. Análise da alavancagem das empresas de capital aberto do agronegócio brasileiro: uma abordagem usando logit multinomial. **Revista de Economia e Agronegócio**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 51-78, 2008.

BROTTI, M.G.; LAPA, J. S. Modelo de avaliação do desempenho da administração da escola sob os critérios de eficiência, eficácia, efetividade e relevância. **Avaliação**, Campinas; Sorocaba, SP, v. 12, n. 4, p. 625-661, dez. 2007.

BRUNO, R. Agronegócio, palavra política. VII Congresso da Associação Latino Americana de Sociologia Rural. **ALASRU**, 2010.

Porto de Galinhas, Pernambuco. 2010. Meio magnético.

BUARQUE, S. Cadeia produtiva da indústria sucroalcooleira: cenários econômicos e estudos setoriais. **Cadernos Setoriais, SEBRAE**. Recife, Pernambuco. 2008.

BUENO, D.F.S. *et al.* A Utilização da Análise por Envoltória de Dados na Liberação de Crédito em uma Agência Bancária no Rio Grande do Sul. **VIII SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – 2011**.

BURNQUIST, H. L. **Mechanical harvesting**: balance between costs and opportunities. Abr-Jun.2011. Disponível em: <<http://www.revistaopinioes.com.br/aa/materia>>. Acesso em set.2011.

CABRERA, V. E.; SOLÍS, D., CORRAL, J. Determinants of technical efficiency among dairy farms in Wisconsin. **Journal of Dairy Science**, Volume 93, Issue 1, January 2010, Pages 387-393. 2010.

CÁCERES, N.T.; ALCARDE, J.C. Adubação verde com leguminosas em rotação com cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). **STAB**, v.13, n.5, p.16-20, 1995.

CAETANO, M.A.R; MIRANDA, R. B. Comparativo internacional para a Previdência Social. **Texto para discussão**. Brasília, set. 2007. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/sites/000/2/publicacoes/tds/td_1302.pdf>. 2007.

CALVO, M. C. M. **Hospitais públicos e privados no sistema único de saúde do Brasil**: o mito da eficiência privada no Estado de Mato Grosso em 1998.2002. 223f. Tese (Doutorado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis, 2002.

CAMARGO, A. M. P. *et al.* Dinâmica e tendência da expansão da cana-de-açúcar sobre as demais atividades agropecuárias. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 38, n. 3, p. 47-61, mar. 2008.

CAMPOS, P.F.; RIBEIRO, P.H.P.; PEDROZO, M.A.; SOARES, R.A.B.; EVANGELISTA, A.W.P. Efeito de diferentes lâminas de reposição hídrica e cobertura do solo com palha na produtividade da

- cana-de-açúcar. **Gl. Sci Technol**, Rio Verde, v. 06, n.02, p.55-65, maio/ago. 2013.
- CARVALHO, E. P. Toda a energia da cana - relação de troca. **Agroanalysis**. São Paulo: FGV. Edição Especial. Junho de 2006, p. 2-24.
- CASADO, F. L. Análise envoltória de dados: conceitos, metodologia e estudo da arte na educação superior. **Sociais e Humanas**, Santa Maria, v. 20. n. 01, jan/jun. 2007, p. 59-71.
- CASTRO, A. M. G.; COBBE, R. V.; GOEDERT, W.J. **Prospecção de demandas tecnológicas**: Manual metodológico para o SNPA. Brasília: Embrapa-DPD, 1995. 82 p.
- CASTRO, A. M. G.; LIMA, S.M. V.; HOEFLICH, V. A. **Curso sobre prospecção de cadeias produtivas**. Florianópolis: UFSC/ Embrapa/ Senar, 2000. 300 p.
- CASTRO, A. M. G; LIMA, S.M.V; CRISTO, C.M.P.N. Cadeia produtiva: marco conceitual para apoiar a prospecção tecnológica. In: XXII SIMPÓSIO DE GESTÃO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2002, Salvador. **Anais...** Salvador, 2002.
- CAUCHICK MIGUEL P. A. (Org.) **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 226 p.
- CAVES, D. W. *et al.* Multilateral Comparisons of output, input, and productivity using superlative indices numbers. **Economic Journal**, March, p 73-86, 1982.
- CEPEA-Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/>>. Acesso em 04 set. 2013.
- CERRI, C. E. P., GALDOS, M. V., CARVALHO, J. L. N., FEIGL, B. J., CERRI, C.C. Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. **Sci. Agric.** v. 70, n. 5, p. 361-368, September/October, 2013.

CESCONETTO, A.; LAPA, J. S. CALVO, M. C. M. Avaliação da eficiência produtiva de hospitais do SUS de Santa Catarina, Brasil. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 10, p. 2407-2417, out., 2008.

CHANG, H. H.; MISHRA, A. K. Does the Milk Income Loss Contract program improve the technical efficiency of US dairy farms? **Journal of Dairy Science**, v. 94, n. 6, p. 2945-2951, Jun 2011.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision-making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, n. 3, p. 429-444, 1978.

CHARNES A, COOPER W, LEWIN A.Y, SEIFORD L.M. Data Envelopment Analysis: theory, methodology, and Application. **Kluwer Academic Publishers**. 1997.

CIA – Central Intelligence Agency. **Agriculture – Products**, 2012. Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/br.html>. Acessado em 23 set 2013.

CNA-Confederação Nacional da Agricultura e Pecuária. **Disponível em:** <<http://www.cna.org.br/inicio.htm>>. Acesso em: 06 dez. 2011.

COELLI, T. J. A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program. 1996. Australia. Disponível em: <http://www.owl.net.rice.edu/~econ380/DEAP.PDF>. Acessado em 26 nov 2013.

COELLI, T. J. A multi-stage methodology for the solution of orientated DEA models. **Operations Research Letters**, v. 23, p. 143-9, 1998.

COELLI, T. J.; RAO, S. P. **Total Factor Productivity Growth in Agriculture: A Malmquist Index Analysis of 93 Countries, 1980-2000**, CEPA Working Papers Series WP022003, School of Economics, University of Queensland, Australia, 2003.

CONAB-Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 29 set. 2013.

CONSECANA - Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e

- álcool do Estado de São Paulo. **Manual de Instruções**. Piracicaba, Manual de instruções. São Paulo, 2006.
- COOK, W.D.; ZHU, J. **Data Envelopment Analysis**: modeling operational processes and Measuring Productivity. Kluwer Academic Publishers, 247 p., 2008.
- COOPER, W. W.; LI, S.; SEIFORD, L. M.; ZHU, J. Sensitivity analysis in DEA. In: Handbook on data envelopment analysis. Boston: **Kluwer Academic**, chap. 3, p. 75-97. 2004.
- COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; TONE, K. Data Envelopment Analysis: a Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software. 2007. 528 p. Disponível em: http://books.google.com.br/books/about/Data_Envelopment_Analysis.html. Acessado em 27 nov. 2013.
- COOPER, R.; SLAGMULDER, R. **Supply chain development for the lean enterprise**: interorganizational cost management. New Jersey: The IMA Foundation for Applied Research, Inc., 1999. 512 p.
- CORREIA, T.C.V.D. ; SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; ANGULO-MEZA, L. Eficiência técnica das companhias aéreas brasileiras: Um estudo com análise envoltória de dados e conjuntos nebulosos. **Produção** (São Paulo. Impresso), v. 21 (4), p. 676-683, 2011.
- COSTA, C. K. F. **Ensaio sobre a economia dos transplantes renais no Brasil: incentivos e eficiência**. 2012. 144f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Economia, Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (UFRS). Porto Alegre, 2012.
- DALBERTO, C. R.; ERVILHA, G. T.; BOHN, L.; GOMES, A. P. Índice de Desenvolvimento Humano Eficiente: Uma Mensuração Alternativa do Bem Estar das Nações. In: XVI Encontro Regional de Economia da Região Sul - ANPEC SUL, 2013, Curitiba. **Anais da XVI ANPEC SUL**, 2013.
- DELGADO, V. M. S.; MACHADO, A. F. Eficiência das Escolas Públicas Estaduais de Minas Gerais. **Pesquisa e Planejamento**

Econômico (Rio de Janeiro), v. 37, p. 427-464, 2007.

DEMATTÊ, J.L.I. Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Informações Agronômicas**, n. 111, set., 2005.

DIAS, F.L.F.; MAZZA, J.A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R.F. Produtividade de cana-de-açúcar em relação ao clima e solos da região Noroeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.627-634, 1999.

DIMARA, E. *et al.* Productive efficiency and firm exit in the food sector. **Food Policy**, v. 33, n. 2, p. 185-196, 2008.

DIOS-PALOMARES RAFAELA, R.; MARTÍNEZ-PAZ, J. M. Technical, quality and environmental efficiency of the olive oil industry. **Food Policy**, v. 36, n. 4, p. 526-534, 2011.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em:<<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar>>. Acesso em: 03 out. 2013.

ENSSLIN, L. ENSSLIN, S.R. **Conteúdo da disciplina Avaliação de desempenho**. Florianópolis, SC: PPGEP-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

FAEMG/SEAPA – Federação da Agricultura do Estado de Minas Gerais/Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. Perfil do agronegócio. Dezembro/2013. Disponível em: http://www.agricultura.mg.gov.br/images/files/perfil/perfil_brasil1.pdf. Acesso em 28 dez 2013.

FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; NORRIS, M.; ZHANG, Z. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries, **American Economic Review**, p. 66-83. 1984.

FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; LOVELL, C. A. K. **Production frontiers**. Cambridge University Press. 1994. 294 p.

FARINA, E. 2013. A política de petróleo e a indústria de etanol no

- Brasil. Disponível em: <http://www.unica.com.br/palavra-do-presidente/16/09/2013>. Acesso em 30 out 2013.
- FARRELL, J. M. The Measurement of Productive Efficiency. **Journal of the Royal Statistics Society**, Series A (General), Part III, v. 120, n.3. p. 253-290, 1957.
- FAO-Food and Agriculture Organization – FAO/ FAOSTAT. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/535/default.aspx>>. Acesso em nov. 2013.
- FERNANDES, A.C. Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar. **STAB**. Piracicaba, SP, Brasil, 2000.
- FERREIRA, A. A.; REIS, A.C.F.; PEREIRA, M.I. **Gestão empresarial**: de Taylor aos nossos dias: evolução e tendências da moderna administração de empresas. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2002. 256 p.
- FERREIRA, C. M. C.; GOMES, A. P. **Introdução à análise envoltória de dados**: teoria, modelos e aplicações. Viçosa: Editora UFV. 389 p. 2009.
- FERREIRA, M. A. BRAGA, M. J. Eficiência das sociedades cooperativas e de capital na indústria de laticínios. **Rev. Bras. Econ.** vol.61, n.2, Rio de Janeiro, abr./jun.2007. p. 231-244.
- FERREIRA, M. A. M. Eficiência técnica e de escala de cooperativas e sociedades de capital na indústria de laticínios do Brasil. 2005. 158f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 2005.
- FERREIRA, R. N.; SANTOS, A. C.; LOPES, A. L. M; NAZARETH, L. G. C.; FONSECA, R. A. F. Governança corporativa, eficiência, produtividade e desempenho. **RAM-Revista de Administração Mackenzie**, v.14, n.4, São Paulo, SP, Jul./Ago, 2013.
- FRIED, H. O., LOVELL, C.A.K.; SCHMIDT, S. S. **The Measurement of Productive Efficiency**: Techniques and Applications. Oxford: Oxford University Press, 1993. 426p.

FURASTÉ, P.A. **Normas técnicas para o trabalho científico:** elaboração e formatação. 14. ed. Porto Alegre: s.n, 2008. 307 p.

GALLARDO A.L.C.F & BOND A. Capturing the implications of land use change in Brazil through environmental assessment: Time for a strategic approach? **Environ Impact Asses Rev.** 2010. doi:10.1016/j.eiar.2010.06.002.

GARCIA, J. C. C.; VON SPERLING, E. Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em Minas Gerais. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 3, Set. 2010.

GARSDALE, A.L. **Sustainable sugar cane farming systems:** developments to Date. Paper presented at Outlook 2003, Canberra, Australia. 4–5 March 2003.

GASQUES, J. G.; REZENDE, G. C.; VERDE, C. M. V.; SALERNO, M. S.; CONCEIÇÃO, J. C. P. R.; CARVALHO, J. C. S. Desempenho e crescimento do agronegócio no Brasil. Piracicaba: IPEA, 2008. (Texto para discussão, 1009). Disponível em: <www.ipea.gov.br/pub/td/2008/td_1009.pdf>. Acesso em: 16 set. 2011.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 171p., 2007.

GODOY, A. S. Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. **RAE**, São Paulo, v. 35, n.3, p.20-29, 1995.

GOES, T. e MARRA, R. A expansão da cana-de-açúcar e a sua sustentabilidade. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2008/>>. Acesso em 01 de jun. 2011.

GOLANY, B.; ROLL, Y. An Application Procedure for DEA. **OMEGA Int. J. of Mgmt Sci.**, v. 17, n. 3, p. 237-250, 1989.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science.** v. 315, n. 5813, p. 808-810, Feb. 2007. doi:10.1126/science.1137013

GOLDEMBERG J. The Brazilian biofuels industry. **Biotechnology for**

Biofuels, 2008, 1:6. DOI:10.1186/1754-6834-1-6, 2008.

GOLDEMBERG, J. The role of biomass in the world's energy system. In: BUCKERIDGE, M. S.; GOLDMAN, G. H., (eds). **Routes to cellulosic ethanol**. New York: Springer, 2010. p. 3-14.

GOMES, A. P. Impactos das transformações da produção de leite no número de produtores e requerimentos de mão-de-obra e capital. 1999. 161f. Tese (Doutorado em Economia Rural) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

GOMES, A. P.; DIAS, R. S. Produtividade e eficiência como fatores determinantes da rentabilidade na atividade leiteira . In: XLII Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2004, Cuiabá. Dinâmicas Setoriais e Desenvolvimento Regional. Brasília: **SOBER**, 2004. v. 1. p. 1-20.

GOMES; A. P.; A. J. M. S. BAPTISTA. Análise envoltória de dados: conceitos e modelos básicos. In: SANTOS, M. L; VIEIRA, W. C. (Editores). **Métodos quantitativos em economia**. Viçosa: UFV, 2004. Cap. 5, p. 121-160.

GOMES, E. G. G.; MANGABEIRAS, J. A. C. Uso de análise de envoltória de dados em Agricultura: o caso de Holambra. **Engevista**, v. 6, n. 1, p. 19-27, abr. 2004.

GOMES, E. G.; MANGABEIRAS, J. A. C.; MELLO, J. C. C. B. S. Análise de envoltória de dados para avaliação de eficiência e caracterização de tipologias em agricultura: um estudo de caso. **RER**, Rio de Janeiro, v. 43, n° 04, p. 607-631, out/dez. 2005.

GOMES, E. G.; MELLO, J. C.C.B.S.; LINS, M.P.E. Redistribuição de inputs e outputs em modelos de Análise Envoltória de Dados com Ganhos de Soma Zero. **Pesquisa Operacional**, v.24, n.2, p.269-284, Maio-Agosto de 2004.

GOMES, E. G.; SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; SOUZA, G.S.; ANGULO-MEZA, L.; MANGABEIRAS, J.A.C. Efficiency and sustainability assessment for a group of farmers in the Brazilian Amazon. **Annals of Operations Research**, v. 169, p. 167-181, 2009.

GONÇALVES, R. M. L. *et al.* Analysis of technical efficiency of milk-producing farms in Minas Gerais. **Economia Aplicada**, v. 12, n. 2, p. 321-335, 2008.

GRAHAM, M. Developing a social perspective to farm performance analysis. **Ecological Economics**, v. 68, n. 8-9, p. 2390-2398, 2009.

GRAMANI, M. C. N.; DUARTE, A. L. D. C. M. O impacto do desempenho das instituições de educação básica na qualidade do ensino superior. **Ensaio: Avaliação e Políticas Públicas em Educação**, v. 19, p. 679-702, 2011.

GUEDES, S.N.R.; GALLO, Z.; MARTINS, L.A.T.P. Passado, presente e futuro da agroindústria canavieira do Brasil: uma reflexão a partir da perspectiva do desenvolvimento sustentável. In: MORAES, M. A. F. D. de, SHIKIDA, P. F. A. (Coords.). **Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios**. São Paulo: Atlas, 2002. p. 312-9.

GUNDUZ, O. *et al.* Measuring the technical and economic efficiencies of the dry apricot farms in Turkey. **Journal of Food Agriculture & Environment**, v. 9, n. 1, p. 319-324, Jan 2011.

HANSSON, H. Strategy factors as drivers and restraints on dairy farm performance: Evidence from Sweden. **Agricultural Systems**. v. 94, n. 3, p. 726-37, June 2007.

HASNAH *et al.* Assessing the performance of a nucleus estate and small holder scheme for oil palm production in West Sumatra: A stochastic frontier analysis. **Agricultural Systems**, v. 79, n. 1, p. 17-30, 2004.

HOLLANDA, J. B. Eficiência energética na indústria da cana. **Opiniões**. Jan-mar. 2008.

HOPPEN, N.; LAPOINTE, L.; MOREAU, E. Um guia para a avaliação de artigos de pesquisa em sistemas de informação. **REAd**. 3. ed. v. 2. n. 2, nov. 1996.

[HTTP://WWW.COMCIENCIA.BR/](http://www.comciencia.br/) COMCIENCIA. Acesso em: 28 dez. 2013.

- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 29 nov. 2013.
- IDEA News. 2004. **Disponível em:** <http://www.udop.com.br/index.php?item=caracteristicas> . Acesso em: 18 abr. 2013.
- ISMAIL, R. Technical efficiency, technical change and demand for skills in Malaysian food-based industry. **European Journal of Social Sciences**, v. 9, n. 3, p. 504-515, 2009.
- JANK, M.S. Etanol - Novo ciclo de crescimento. ÚNICA-União da indústria de cana-de-açúcar. **Disponível em:** <<http://www.unica.com.br/opiniaio/>>. Acesso em: 01 de jun. 2013.
- KANEKO, F. H.; TARSITANO, M. A. A.; RAPASSI, R. M. A.; CHIODEROLI, C. A.; NAKAYAMA, F. T. Análise econômica da produção de cana-de-açúcar considerando-se a terceirização das operações agrícolas: o caso de um produtor rural. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.39, n.3, p. 266-270. 2009.
- KASSAI, S. **Utilização da Análise por Envoltória de Dados (DEA) na Análise de Demonstrações Contábeis**. 2002. Tese (Doutorado)-Departamento de Contabilidade e Atuária. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2002.
- KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos avançados em São Paulo**, v. 24, n. 68, 2010.
- LACERDA, R. T. O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gest. Prod.**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 59-78, 2012.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- LANA, R. P.; GUIMARÃES, G. Uso racional de nutrientes na agricultura e pecuária. In: II Simpósio Brasileiro de Agropecuária Sustentável – **II SIMBRAS: Agropecuária, Agroecologia e Cooperativismo**. 23 a 26 de set. 2010, Viçosa, MG. p. 105-122., 2010.

LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A.; ANJOS, I. A.; VASCONCELOS, A. C. M.; PINTO, L. R., CRESTE, S. Potencialidade de novas variedades de cana. In: MARQUES, M.O. *et al.* (Edit.). **Tópicos em tecnologia sucroalcooleira**. Jaboticabal: Gráfica Multipress, 2006. p. 17-30.

LANDELL, M. G. A.; BRESSIANI, J. A. Melhoria genética, caracterização e manejo varietal. Cap. 5. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Editores). **Cana de açúcar**. Piracicaba: IAC, 2010. p. 101-55.

LAPA, J. S. NEIVA, C. C. Avaliação em educação: comentários sobre desempenho e qualidade. Ensaio: aval. pol. públ. **Educ.**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 12, p. 213-236, jul./set. 1996.

LIMA, S. C. **Desempenho fiscal da dívida dos grandes municípios brasileiros**. 2011. 193 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LINS, M. E. P.; ALMEIDA, B. F.; BARTHOLO JUNIOR, R. Avaliação de desempenho na pós-graduação utilizando a Análise Envoltória de Dados: o caso da Engenharia de Produção. **RBPG**, n. 1, jul. 2004. P. 41-56.

LINS, M.P.E.; ANGULO-MEZA, L. **Análise Envoltória de Dados e perspectivas de integração no ambiente de Apoio à Decisão**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 2000.

LINS, M.P.E.; CALÔBA, G. M. **Programação linear: com aplicações em teoria dos jogos e Data Envelopment Analysis**. Rio de Janeiro: Interciência. 2006, 299 p.

LINS, M.P.E.; MOREIRA, M.C.B. Implementação com seleção de variáveis em modelos DEA. In: ESTELLITA LINS, M.P.; ÂNGULO-MEZA, L. (Eds.) **Análise envoltória de dados e perspectivas de integração no ambiente do apoio à decisão**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000. p. 37-52.

LOBO, M.S.C.; LINS, M.P.E.; SILVA, A.C.M.; FISZMAN, R. Impacto

da reforma do financiamento de hospitais de ensino no Brasil: Índice de Malmquist/DEA. **XL SBPO**, João Pessoa, Paraíba, set. 2008.

LOPES, A. L. M.; LORENZETT, J. R.; PEREIRA, M.F. Data Envelopment Analysis (DEA) como ferramenta para avaliação do desempenho da Gestão Estratégica. **Revista Universo Contábil**, v. 7, p. 77-94, 2011.

LOPES, A. L. **Notas de aula** da disciplina “Tópicos em mercadologia e administração estratégica: avaliação estratégica do desempenho em organizações”. Partes I e II. Faculdade de Ciências Econômicas, Departamento de Ciências Administrativas do Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração. Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG, setembro a novembro de 2012.

LORENZETT, J.R.; LOPES, A. L. M.; LIMA, M. V. A. Aplicação de método de pesquisa operacional (DEA) na avaliação de desempenho de unidades produtivas para área de educação profissional. **Estratégia e Negócios**, Florianópolis, v. 1, n. 2, jan./jun. 2010.

LOVELL, C. A. K. Applying efficiency measurement techniques to the measurement of productivity change. **Journal of Productivity Analysis**, 7, 329–340, 1996.

LOVELL, C. A. K. The Decomposition of Malmquist Productivity Indexes. **Journal of Productivity Analysis**, 20, 437–458, 2003.

LUO, X. M. An introduction to data envelopment analysis. **Journal of Marketing Research**, v. 41, n. 3, p. 365-368, Aug 2004.

MACEDO, I.C. **A energia da cana-de-açúcar**: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade. 2. ed. São Paulo: UNICA, 231 p., 2007.

MACEDO, I.C. Situação atual e perspectivas do etanol. **Revista Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 157-165, 2007a.

MACEDO, I.C. *et al.* **Balço 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.

MACEDO, M. A. S.; BENJIO, M. Mensurando a Eficiência da Relação Risco x Retorno em Ativos através da Análise Envolvória de Dados. XXXVIII Congresso Latino-Americano de Escolas de Administração (CLADEA), 2003, Lima, Peru. **Anais do XXXVIII CLADEA**, 2003.

MACEDO, M. A. S.; CÍPOLA, F. C.; FERREIRA, A. F.R. Desempenho social no agronegócio brasileiro: aplicando DEA no segmento de usinas de processamento de cana-de-açúcar. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 1, p. 223-243, 2010.

MACHADO, A. G. C. Fatores de decisão para a localização das instalações de manufatura. In: XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...** Curitiba – PR, 23 a 25 de outubro de 2002.

MACHADO, J. G. C. F. Adoção da tecnologia de informação na pecuária de corte. São Carlos, UFSCar. **Tese (Doutorado)**, 2007, 216 p.

MAGRO, C. R.; LACA-BUENDÍA, J. P. Efeito da profundidade de plantio no perfilhamento da cana-de-açúcar. **FAZU em Revista**, Uberaba, n.7, p. 48- 54, 2010.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MALMQUIST, STEN. Index numbers, and indifference surfaces. **Trabajos de Estadística** 4, 209–242. 34 p. 1953.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/mapa>>. Acesso em: 07 nov. 2013.

MARIN, F.R.; LOPES-ASSAD, M.L.; ASSAD, E.D.; VIAN, C.E.; SANTOS, M.C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 1449-1455, 2008.

MARINHO, A.; FAÇANHA, L. O. Programas Sociais: efetividade, eficiência e eficácia como dimensões operacionais da avaliação. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – **IPEA**. Texto para

discussão n. 787. Rio de Janeiro, abril de 2001.

MARINHO, A.; CARDOSO, S. S.; ALMEIDA, V. V. Avaliação de eficiência em sistemas de saúde: Brasil, América Latina, Caribe e OCDE. Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), n. 1784. 2012. Disponível em: <www.econstor.eu>, IPEA, 2012, acessado em 30 jun. 2014.

MARINHO, E.; CARVALHO, R. M. Comparações inter-regionais da produtividade total, variação da eficiência técnica e variação tecnológica da agricultura brasileira – 1970 a 1996. **Pesquisa e Planejamento Econômico/PPE**, v. 34, n. 1, abr. 2004.

MARINHO, E.; SOARES F.; BENEGAS, M. Desigualdade de renda e eficiência técnica na geração de bem-estar entre os Estados Brasileiros," **Revista Brasileira de Economia, FGV/EPGE** Escola Brasileira de Economia e Finanças, Fundação Getúlio Vargas, v. 58, n. 4, p. 583-608, outubro de 2004.

MARION, J. C.; SEGATTI, S. **Contabilidade da pecuária**. São Paulo: Atlas, 10 ed. 2012.

MARION, J.C.; SEGATTI, S. Gerenciando custos agropecuários. **Custos e @gronegocio on line**. v. 1, n. 1, Jan/Jun – 2005. Disponível em: <www.custose agronegocioonline.com.br>

MARQUES, R. C.; SILVA, D. Análise da variação da produtividade dos serviços de água portugueses entre 1994 e 2001 usando a abordagem de Malmquist. **Pesquisa Operacional**, v.26, n.1. p.145-168, janeiro a abril de 2006.

MARTINELLI, L. A. *et al.* Sugar and ethanol production as a rural development strategy in Brazil: Evidence from the state of São Paulo. **Agricultural Systems**, v. 104, n. 5, p. 419-428, 2011.

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Balança Comercial. **Disponível em:**<<http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/noticia>>. Acessado em 18 dez 2013.

MELLO, J. C. C. B. S.; ÂNGULO-MEZA, L.; GOMES, E. G.;

SERAPIÃO, B. P.; LINS, M. P. E. Análise de envoltória de dados no estudo da eficiência e dos benchmarks para companhias aéreas brasileiras. **Pesquisa Operacional**, v. 23, n. 2, p. 325-345, 2003.

MELLO, J. C. C. B. S; ÂNGULO-MEZA, L.; GOMES, E. G.; BIONDI NETO, LUIZ. Curso de Análise de Envoltória de Dados. In: XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional e Desenvolvimento sustentável, 27 a 30/09/2005, Gramado, RS. **Anais...** 2005.

MONTGOMERY, C.A.; PORTER, M.E. **Estratégia: a busca da vantagem competitiva**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1998.

MOREIRA, C.K. **Administração: mudanças e perspectivas**. São Paulo: Saraiva, 524 p., 2005.

MOREIRA, M.G; BONIZIO, R.C. Análise comparativa dos custos de cana-de-açúcar: produção independente x usina de açúcar e álcool. **Custos e @gronegocio on line**. v. 8, n. 2, Abr/Jun. 2012.

MOREIRA, N. P. *et al.* Fatores determinantes da eficiência dos programas de pós-graduação acadêmicos em Administração, Contabilidade e Turismo. **Avaliação: Revista da Avaliação da Educação Superior (Campinas)**, v. 16, p. 201-230, 2011.

MORELLI, J.L.; DABEN, A. E.; ALMEIDA, J. O. C.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeito do gesso e do calcário nas propriedades químicas de solos álicos e na produção da cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.6, 1987.

MORI, C.; BATALHA, M.O.; ALVES FILHO, A.G. Abordagens espaço-relacional de organização da produção em estudos de atividade de produção agroindustrial no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 5, n. 3, p. 94-115, 2009.

MONZAMBANI, A. E. *et al.* História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; *et al.* (org). Piracicaba: CP 2, cap. 1, p. 11-19, 2006.

MOZAMBANI, A. E.; *et al.* M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V. *et. al.* (Orgs). **Atualização em produção de cana-**

de-açúcar. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 11-18.

MULWA, M. R.; EMROUZNEJAD, A. Measuring productive efficiency using Nerlovian profit efficiency indicator and metafrontier analysis. **Operational Research**, p. 1-17, 2011.

MULWA, M. R. *et al.* Impact of liberalization on efficiency and productivity of sugar industry in Kenya. **Journal of Economic Studies**, v. 36, n. 3, p. 250-264, 2009.

MULWA, R. *et al.* An overview of Total Factor Productivity estimations adjusted for pollutant outputs: An application to sugarcane farming. **International Journal of Environmental Technology and Management**, v. 15, n. 1, p. 1-15, 2012.

NEVES, M. F; CONEJERO, M. A. Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica. **Economia Aplicada**, São Paulo, v. 11, n. 4, p. 587-604, out.–dez. 2007.

OLIVEIRA, D.P.R. **Sistemas, organização e métodos**: uma abordagem gerencial. São Paulo: Atlas, 18 ed., 2009a. 482 p.

OLIVEIRA, M. Cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.energisa.com.br_2009/>. Acesso em 03 set 2013. 2009.

OLIVEIRA, M.W.; FREIRE, F.M.; MACÊDO, G.A.R.; FERREIRA, J.J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**, v. 28, n.239. Belo Horizonte. p. 30-43. 2007.

OLIVEIRA, O. J.; PINHEIRO, C.R.M.S. Implantação de sistemas de gestão ambiental ISO 14001: uma contribuição da área de gestão de pessoas. **Revista Gestão & Produção**. UFSCar. São Carlos, SP, v. 17, n. 1. p. 51-61, mar. 2010.

OLIVEIRA, T. B. A; OLIVEIRA, M.W; FARIA, R.O; HESPANHOL, P.O. Custo de produção e tecnologia em cultura de cana-de-açúcar de alta produtividade.In: XXXIII ENEGEP – Ouro Preto, MG, Brasil, 22 a 24 de outubro de 2003. Anais... Ouro Preto, 2003.

- OLIVEIRA, T. B. A.; SELIG, P.M.; CAMPOS, L.M.S., OLIVEIRA, M.W.; ARISTIDES, E. V.S. A adubação verde com crotalaria juncea por ocasião da reforma do canavial aumenta a produtividade e diminui os custos de produção. In: VIII Congresso Latinoamericano de Sociologia Rural. **Anais...** Porto de Galinhas, Pernambuco, 2010.
- OLIVEIRA, T. B. A; SELIG P. M.; BARBOSA, V. M.; CAMPOS, L.M.S.; OLIVEIRA, M. W. Sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar: um estudo de caso em uma propriedade agrícola. In: XII Congreso Internacional de Costos. **Anais...** Punta del Este. Uruguay. 27-29 nov. 2011.
- OLIVEIRA, T. B. A; SELIG P. M.; BARBOSA, V. M.; CAMPOS, L.M.S.; BORNIA, A.C.; OLIVEIRA, M. W. Tecnologia e custos de produção de cana-de-açúcar: um estudo de caso em uma propriedade agrícola. **Latin American Journal of Business Management**, 2012.
- OLIVEIRA, T.B.A; BORNIA, A.C.; OLIVEIRA, M.W. Gestão do conhecimento na produção de cana-de-açúcar. In: XIII SEPROSUL - Semana de la Ingeniería de Producción Sudamericana. **Anais...** Gramado – Brasil. Junho de 2013.
- ONUSIC, L. M.; CASA NOVA, S. P. C.; ALMEIDA, F. C. Modelos de previsão de insolvência utilizando a análise por envoltória de dados: aplicação a empresas brasileiras. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 11, p. 77-97, 2007.
- ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JR., E.; AGUJARU, R. Efeito da aplicação prolongada da vinhaça nas propriedades químicas dos solos com cana-de-açúcar: Estudo exploratório. **STAB**, Piracicaba, v.1, p.28-33, 1983.
- ORO, I. M. *et al.* Análise da eficiência de empresas familiares brasileiras. **RAE Eletrônica**, v. 8, p. 0-0, 2009.
- PALADINI, E. P. **Gestão Estratégica da Qualidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009. 220p.
- PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como

- material de substituição parcial de cimento Portland. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.** Campina Grande, v. 13, n. 3, Maio/Jun. 2009.
- PAULILLO, L. F.; VIAN, C. E. F.; SHIKIDA, P. F. A.; MELLO, F. T. Álcool combustível e biodiesel no Brasil: quo vadis? **Rev. Econ. Sociol. Rural [online]**. v. 45, n. 3, 2007.
- PEÑA, C. R. Um modelo de avaliação da eficiência da administração pública através do método análise envoltória de dados (DEA). **Revista de Administração Contemporânea**, v. 12, p. 83-106, 2008.
- PESSANHA, J. F. M. *et al.* Avaliação dos custos operacionais eficientes das empresas de transmissão do setor elétrico Brasileiro: uma proposta de adaptação do modelo dea adotado pela ANEEL. **Pesquisa Operacional**, v. 30, p. 521-545, 2010.
- PIEWTHONGNGAM, K.; SUKSAWAT, J.; TENGLOLAI, A. **Identifying efficient cane growers and exploiting their expertise in improving inefficient ones?** Essan Center for Business and Economic Research, Khon Jaen, Thailand. Proceeding of the 2007 IEEE IEEEM. p.1654-1658.
- PIMENTEL, D; PATZEK, T.W. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. **Nat Res Research**. v. 14, n. 1, p. 65-76, 2005.
- PINAZZA, A. E.; CASAGRANDE, J.C.; STOLF, R; LUZ, P. H. C. Cultura da cana-de-açúcar – Manual de orientação. **Instituto do Açúcar e do Álcool**. Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar. PLANALSUCAR. 1986. 56 p.
- PLANALSUCAR. **Cultura da cana-de-açúcar**: manual de orientação. Piracicaba: IAA, Coordenadoria Regional Sul, 1986. 56p.
- PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil. **Informações Agronômicas**, n. 110, p. 12-17 (Encarte Técnico). 2005.
- RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute. 2011. 420 p.

RAPASSI, R. M. A.; TARSITANO, M. A. A.; BOLONHEZI, A. C. Avaliação técnica e econômica de sistemas de produção da cana-de-açúcar (*saccharum spp*) na região oeste do Estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, SP, v.39, n.10, out. 2009.

RAY, S. C. **Data Envelopment Analysis**: theory and techniques for economics and operations research. USA: Cambridge University Press, 2004.

RAY, S. C.; DESLI, E. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries: comment. **The American Economic Review**, v. 87, n. 5 (Dec., 1997), p. 1033-1039.

REIG-MARTINEZ, E. *et al.* Ranking farms with a composite indicator of sustainability. **Agricultural Economics**, v. 42, n. 5, p. 561-575, Sep 2011.

REIS, P. R. C.; DRUMOND, A. M.; SILVEIRA, S. F. R. Emancipação municipal e eficiência nos gastos públicos para geração de bem-estar nos municípios mineiros de pequeno porte. In: XVIII Congresso Brasileiro de Custos, 2011, Rio de Janeiro. **Anais... XVIII Congresso Brasileiro de Custos**, 2011.

RIBEIRO JÚNIOR, J.I. **Análises estatísticas no Excel**: Guia prático. Viçosa: UFV, 2008. 251 p.

RIBEIRO, M. B. Qualidade do Gasto Público. Finanças Públicas. XIII Prêmio Tesouro Nacional. Disponível em: <[http://www. tesouro.fazenda.gov.br/Premio_TN/XIIIPremio/qualidade/3qualidadeXI IIPTN/Desempenho_Eficiencia_gastoPublico.pdf](http://www.tesouro.fazenda.gov.br/Premio_TN/XIIIPremio/qualidade/3qualidadeXI IIPTN/Desempenho_Eficiencia_gastoPublico.pdf)>. Acesso em 28 dez. 2011. 2008.

RIDESA-Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. Disponível em:<<http://www.ridesa.com.br/>>. Acesso em: 02 jan. 2012.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L.; CASAGRANDI, D. V.; IDE, B.Y. **Plantio da cana-de-açúcar**. Piracicaba – ESALQ. 198 p. 2007.

RISSARDI JÚNIOR, D. J.; SHIKIDA, P. F. A. A agroindústria

canaveira do Paraná pós-desregulamentação: uma abordagem Neoschumpeteriana. **Rev. Econ. Sociol. Rural**, Brasília, v. 45, n. 2, Abr./Jun. 2007.

ROSSETO, M. R. (Orgs.). **Abertura econômica e competitividade no agronegócio brasileiro: impactos regionais e gestão estratégica**. Passo Fundo: Editora UPF, 2002, p. 181-205.

RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., H. Teor, acúmulo e distribuição de fósforo em plantas de soja em relação ao conteúdo de água do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 14:181-185, 1990.

SAAB, M., S. B. L.; NEVES, M. F.; CLÁUDIO, L. G. O desafio da coordenação e seus impactos sobre a competitividade de cadeias e sistemas agroindustriais. **R. Bras. Zootec.**, v.38, p.412-422, 2009 (supl. especial).

SALGADO JUNIOR, A. P.; BONACIM, C. A. G.; PACAGNELLA JUNIOR, A. C. Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação de eficiência de usinas de açúcar e álcool da região nordeste do Estado de São Paulo. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, Lavras, v.11, n.3, 2009.

SANTOS, C. M.; SANTOS, M.L; BAPTISTA, A.J.M.S. Progresso tecnológico, eficiência e produtividade dos fatores do setor agropecuário na região do Triângulo/Alto Paranaíba, MG, 1985-1995. 2005. XLIII Congresso da **SOBER** - Ribeirão Preto, SP.

SANTOS, G. J.; MARION, J. C. SEGATTI, S. **Administração de custos na agropecuária**. 4 ed. São Paulo: Atlas. 2009.

SANTOS, R. B. N. Eficiência técnica na indústria de base florestal brasileira via metas intermediárias. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 35., n.6, p. 1319-1326, 2011.

SAURIN, V.; LOPES, A. L.; COSTA JÚNIOR, N. C.A. Eficiência e valor: uma abordagem com base na análise envoltória de dados (DEA) aplicada às empresas do setor elétrico no Brasil. **Revista de Economia e Administração**, v.9, n.2, 170-190 p., abr./jun. 2010.

SCARPELLI, M. Planejamento e controle da produção. **In:** BATALHA, M.O (coord.). Gestão Agroindustrial. 2. ed. São Paulo: Atlas, p. 290-380, 2007. v. 1.

SGE/EMBRAPA. Secretaria de Gestão Estratégica. Agricultura. Disponível em: http://www.embrapa.br/a_embrapa/unidades_centrias/sgc. Acessado em 04 de out 2013.

SILVA, A.A.P.; FERREIRA, M.A.M.; BRAGA, M.J.; ABRANTES, L.A. Eficiência na alocação de recursos públicos destinados à educação, saúde e habitação em municípios mineiros. **Contabilidade, Gestão e Governança**. Brasília, v.15, n.1, p. 96-114, jan/abr 2012.

SILVA, G. M. A. Evolução da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar no período de 1984 a 2010. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 29, n.3, p. 26-28, 2011.

SILVEIRA, L. C. I.; BARBOSA, M. H. P.; CHAVES, J. M. P. Variedades melhoradas de cana-de-açúcar para Minas Gerais. **In: Informe Agropecuário**, v. 28, n.239. p. 25-29. 2007.

SIMIONI, K.R.; SILVA, L.F.; BARBOSA, V.; RÉ, F. E.; BERNADINO, C. D.; LOPES, M. L.; AMORIM, H.V. Efeito da variedade e época de colheita no teor de fenóis totais em cana-de-açúcar. **STAB**, v.24, n.3, p.36-39, 2006.

SIMÕES, P.; MARQUES, R. C. Avaliação do desempenho dos serviços de resíduos urbanos em Portugal. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 14, p. 285-294, 2009.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas. 2009.

SMEETS, E.M.W; LEWANDOSWSKI, I.M; FAAIJ, A.P.C. The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting. **Renew Sust Energ Rev**. 13, p. 1230-45, 2009.

SOLLERO, M. K. V.; LINS, M. P. E. 2004. Avaliação de eficiência de distribuidoras de energia elétrica através da análise envoltória de dados

com restrições aos pesos. In: XXXVI SBPO. **Anais...** São João Del'Rei, Minas Gerais. 2004.

SOLOMON, S. Postharvest deterioration of sugarcane. **Sugar Tech**, v. 11, n. 2, p. 109-123. 2009.

SOUSA, M. C. S.; TANNURI-PIANTO, M. E.; ARAUJO, P.L.C.P. Residual and technical tax efficiency scores for Brazilian municipalities: a two-stage approach. 31^o Meeting of the Brazilian Econometric Society, 2009, Foz do Iguaçu. **Anais do XXXI Encontro Brasileiro de Econometria**, 2009.

SOUZA, A. P.; GRANDIS A.; LEITE, D. C. C; BUCKERIDGE, M. Sugarcane as a Bioenergy Source: History, Performance, and Perspectives for Second-Generation Bioethanol. **Bioener Brasília.g. Res.** Springer Science+Business Media New York. 2013.

SOUZA, C. A. D.; ARPINO, G. TI e eficiência organizacional: um estudo no setor brasileiro de bens de capital mecânicos com foco em micro, pequenas e médias empresas. **Produção**, 2011.

SOUZA, M. W.; MACEDO, M. A. S. Análise da eficiência utilizando a metodologia DEA em Organização Militar de Saúde: o caso da Odontoclínica Central do Exército. **Sociedade, Contabilidade e Gestão**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 2, jul/dez 2008.

SOUZA FILHO, H.M.S. Desenvolvimento agrícola sustentável. **In:** BATALHA, M.O. (coord.). **Gestão agroindustrial**. v. 1. cap. 11. São Paulo: Atlas, p. 585-627. 2007.

SOUZA, Z. J.; AZEVEDO, P.F. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Rev. Econ. Sociol. Rural**, vol.44, n.2. Brasília. Abr./Jun. 2006.

STÜKER, H. Uma metodologia de avaliação da eficiência agropecuária de municípios. **Tese (Doutorado)**. Florianópolis, UFSC. 2003. 131p.

STUPIELLO, J.P.A. Expansão canavieira no Brasil. In: II SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇUCAR, 2005, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba: Unipress Disc. Records do Brasil,

2005. CD-ROM.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Data Envelopment Analysis for environmental assessment: Comparison between public and private ownership in petroleum industry. **European Journal of Operational Research**, v. 216, n. 3, p. 668-678, Feb 2012.

SUNDFELD, E.; MACHADO, C. Ações para o desenvolvimento de processos industriais para conversão de biomassa em biocombustíveis. Brasília, DF. **Disponível em:** <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2011/>>. Acesso em: 20 de jun. de 2011.

SURCO, D. F.; WILHELM, V. E. Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliação da eficiência técnica baseada em DEA. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v. 1, p. 41-56, 2006.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 359 p.

TASCA, J.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S.; ALVES, M. An approach for the strategic management process. **Decision Support Systems**, v. 33, p.71-85, 2010.

THRALL R.M. Measures in DEA with an application to the Malmquist Index. **Journal of Productivity Analysis** 13: 125-137, 2000.

TORQUATO, S. A.; MARTINS, R.; RAMOS, S. F. Cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: eficiência econômica das regionais novas e de tradicionais de produção. **Informações Econômicas**, v. 39, n. 5, 2009.

TUPY, O.; YAMAGUCHI, L. C. T. Eficiência e produtividade: conceitos e medição. **Agricultura em São Paulo (SP)**, 45 (2): 39-51, 1998.

UNICA-UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Unicadata: produção. Disponível em: <www.unicadata.com.br/>. Acessado em jun. 2014.

VERMA, A.K; SINGH, S. B.; AGARWAL, A. K.; SOLOMON, S. Influence of postharvest storage temperature, time, and invertase

- enzyme activity on sucrose and weight loss in sugarcane. **Postharvest Biology and Technology**, v. 73, p. 14-21. 2012.
- VIAN, C. E. F.; BELIK, W. Os desafios para a reestruturação do complexo agroindustrial canavieiro do centro-sul. **Revista Economia ANPEC**, v. 4, n. 1, p. 1-18, 2003.
- VILELA, D. L.; NAGANO, M. S.; MERLO, E. M. Aplicação da Análise Envoltória de Dados em Cooperativas de Crédito Rural. **RAC**, 2. ed. (Especial): p. 99-120. 2007.
- VITTI, G.C.; MAZZA, J.A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Informações Agrônomicas**, v. 97, p. 1-16. 2002.
- VOLPATO, G. L. **Ciência**: da filosofia à publicação. 6. ed., cap. VII. São Paulo : Cultura Acadêmica, p. 213-224. 2013.
- XIONG, X. *et al.* A DEA-model evaluation of the efficiency of peasant household credit investigation system in rural credit cooperatives A positive research in Hubei Province, China. **China Agricultural Economic Review**, v. 3, n. 1, p. 54-66, 2011 2011.
- YANG, Wu F. *et al.* Competition strategy and efficiency evaluation for decision making units with fixed-sum outputs. **European Journal of Operational Research**, v. 212, n. 3, p. 560-569, Aug 1 2011.
- WILHELM, V. E.; BARBOSA, S. G. Avaliação do desempenho das escolas públicas por meio de Data Envelopment Analysis. **Acta Scientiarum Technology**, v. 31, p. 71-79, 2009.
- WOLFF, L. D. G. **Um modelo para avaliar o impacto do ambiente operacional na produtividade de hospitais brasileiros**. 2005. 307 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2005.
- WOMACK, J.; JONES, D. **A mentalidade enxuta nas empresas lean thinking**: elimine o desperdício e crie riqueza. Rio de Janeiro: Campus, 2004.

WUTKE, E. B.; ARÉVALO, R. A. Adubação verde com leguminosas no rendimento da cana-de-açúcar e no manejo de plantas infestantes. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2006. **Boletim técnico IAC**, 198.

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E. M.; MARTELLO, L. S.; SAVASTANO JR., H. Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável. X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 18-21 julho 2004, São Paulo, **Anais...**, 2004.

ZHANG, X.-P. *et al.* Total-factor energy efficiency in developing countries. **Energy Policy**, v. 39, n. 2, p. 644-650, Feb 2011.

ZHENG, X. *et al.* Efficiency assessment of listed real estate companies: an empirical study of China. **International Journal of Strategic Property Management**, v. 15, n. 2, p. 91-104, Jun 2011.

ZIMMERMAN, M.P. A cogeração no setor sucroalcooleiro e a infraestrutura energética brasileira. Disponível em: <<http://www.revistaopinioes.com.br/aa/materia>>. Acesso em 15 de jun. 2011.

ZYLBERSZTAJN, D. Conceitos gerais, evolução e apresentação do sistema agroindustrial. In: ZYLBERSZTAJN, D.; NEVES, M. F. (Orgs.). **Economia e gestão dos negócios agroalimentares**. São Paulo: Pioneira, 2000.

_____. Políticas agrícolas e comércio mundial. "Agribusiness": conceito, dimensões e tendências. In: FAGUNDES, H. H. (org). **Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas**. Brasília: IPEA, 1994 (Estudos de Política Agrícola nº 28).

_____. Conceitos gerais, evolução e apresentação do sistema agroindustrial. In: ZYLBERSZTAJN, Decio; NEVES, Marcos F. (Org.). **Economia e gestão dos negócios agroalimentares**. São Paulo: Pioneira Thomson, 2005. p. 1-21.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Aplicação de DEA à canavicultura: um exemplo simplificado utilizando o programa Solver

Dentre as 79 propriedades canavicultoras estudadas foram selecionadas aleatoriamente 13 fazendas para avaliar a eficiência relativa utilizando-se DEA. Nesta análise, foram considerados os totais de insumos empregados durante cinco safras em cada propriedade, assim como a produção total de cana-de-açúcar no período de 2006 a 2011. Para calcular a eficiência técnica relativa das propriedades, foram aplicados os modelos DEA de retornos constantes (CCR) e retornos variáveis de escala (BCC), considerando orientação a insumo.

Uma recomendação de natureza operacional citada nos trabalhos mais recentes é a de que nos modelos DEA o número de unidades consideradas na análise deve ser no mínimo quatro a cinco vezes superior ao somatório das variáveis insumo e produto, para que o modelo apresente resultados consistentes (FERREIRA; GOMES, 2009). Diante disso, foram considerados dois *inputs* (itens necessários à implantação e condução de um canavial) e um *output*:

- a) *Input* 1: Insumos ou matéria-prima (calcário, adubo químico, muda de cana, inseticida e herbicida em kg).
- b) *Input* 2: Serviços (horas-máquina e horas-homem na implantação e condução do canavial, no corte, carregamento e transporte da cana).
- c) *Output*: Produção de cana em toneladas.

O aplicativo Solver da planilha eletrônica *Excel* é considerado um recurso com boa capacidade de processamento em uma plataforma de uso popular (FERREIRA; GOMES, 2009; TAHA, 2008; LINS; CALÔBA, 2006), além de ser considerada ferramenta que facilita a compreensão das especificidades dos métodos de solução dos modelos (KASSAI, 2002).

Diante do exposto, optou-se por utilizar o aplicativo *Solver* da planilha eletrônica *Excel*, para obtenção das medidas de eficiência das 13 fazendas canavicultoras da região da Serra dos Aimorés.

A Tabela “A” ilustra as 13 DMUs em análise, a produção de cana-de-açúcar, em toneladas, representada por y (*output*), e a quantidade consumida do *input* 1 (matéria-prima), representado por x_1 , e do *input* 2 (serviços de mecanização e de recursos humanos na implantação e condução do canavial; no corte, carregamento e transporte

da cana), representado por x_2 .

Tabela A - Produção de cana-de-açúcar (y) e insumos (x_1 ; x_2) de 13 fazendas canavieculoras (denominadas DMUs).

DMU	y	x_1	x_2
	(t)	(kg)	(hora)
1	7.407	334.102	13.687
2	9.642	410.294	17.333
3	8.017	386.899	14.729
4	10.769	514.340	20.101
5	12.047	548.168	21.300
6	15.142	576.194	27.248
7	12.513	552.166	22.488
8	5.965	314.527	11.257
9	11.307	607.671	21.221
10	13.201	513.538	22.893
11	11.008	494.377	20.566
12	17.858	776.377	33.484
13	12.103	458.871	21.596

Fonte: Resultados da pesquisa.

A formulação geral do modelo DEA Envoltório, com retornos variáveis de escala (RVE ou BCC), orientação insumo, de determinado número de DMUs compostas de um produto (y) e dois insumos (x_1 ; x_2), é dada conforme se segue:

Minimizar θ

sujeito a:

- (a) $y_1\lambda_1 + y_2\lambda_2 + y_3\lambda_3 + y_4\lambda_4 + y_5\lambda_5 + y_6\lambda_6 + y_7\lambda_7 + y_8\lambda_8 + y_9\lambda_9 + y_{10}\lambda_{10} + y_{11}\lambda_{11} + y_{12}\lambda_{12} + y_{13}\lambda_{13} \geq Y_0$.
- (b) $x_{11}\lambda_1 + x_{12}\lambda_2 + x_{13}\lambda_3 + x_{14}\lambda_4 + x_{15}\lambda_5 + x_{16}\lambda_6 + x_{17}\lambda_7 + x_{18}\lambda_8 + x_{19}\lambda_9 + x_{10}\lambda_{10} + x_{11}\lambda_{11} + x_{12}\lambda_{12} + x_{13}\lambda_{13} - x_{10} \cdot \theta \leq 0$
- (c) $x_{21}\lambda_1 + x_{22}\lambda_2 + x_{23}\lambda_3 + x_{24}\lambda_4 + x_{25}\lambda_5 + x_{26}\lambda_6 + x_{27}\lambda_7 + x_{28}\lambda_8 + x_{29}\lambda_9 + x_{210}\lambda_{10} + x_{211}\lambda_{11} + x_{212}\lambda_{12} + x_{213}\lambda_{13} - x_{20} \cdot \theta \leq 0$
- (d) $\lambda_1 + \dots + \lambda_{13} = 1$
- (e) $\lambda_1, \dots, \lambda_{13} \geq 0$

Ao utilizar os dados da Tabela “A”, a eficiência técnica relativa é calculada com base em quatro inequações e uma equação (d). Por exemplo, tomando a DMU_2 como DMU objetivo, representada na formulação anterior, por y_0 ; x_{10} ; x_{20} (a que se pretende maximizar), o problema de programação linear para o cálculo da eficiência técnica relativa é assim expresso:

Planilha 2 - Dados das DMUs e definições dos parâmetros do Solver para o Modelo DEA_BCC/Envoltório/RVE/ Orientado a insumo.

The screenshot displays the Microsoft Excel interface with the Solver Parameters dialog box open. The dialog box is configured as follows:

- Definir Objetivos:** \$O\$4
- Para:** Min.
- Alterando Células Variáveis:** \$B\$3:\$N\$4
- Suposto de Restrições:**
 - \$O\$5:\$Q\$5 >= \$Q\$5
 - \$O\$6:\$Q\$6 <= \$Q\$6
 - \$O\$7:\$Q\$7 <= \$Q\$7
 - \$O\$8:\$Q\$8 = \$Q\$8
 - \$B\$3:\$N\$ >= \$Q\$9
- Método de Solução:** LP Simplex

The background Excel sheet shows the following data:

DMU12	DMU13	Teto (θ)	Limites (para FO)
0	0	0,99312638269798	0
17858	12103	9642	9642
776377	458771	0	0
33484	21596	0	0
1	1	1	1
≥	≥	1	≥

Em seguida, na janela “Parâmetros do Solver” definiu-se a célula de destino “\$O\$4” (função objetivo) para minimizar os *inputs*, alterando as células variáveis (células \$O\$4; \$B\$3:\$N\$4), sujeito às restrições (\$O\$5 ≥ \$Q\$5; \$O\$6 ≤ \$Q\$6; \$O\$7 ≤ \$Q\$7; \$O\$8 = \$Q\$8; \$B\$3:\$N\$ ≥ \$Q\$9).

Observe-se, na planilha *Excel*, que as células variáveis (B3) a (N4) contêm os pesos (λ), os quais foram estimados pelo modelo e atribuídos a cada variável insumo-produto, de cada DMU analisada. Os resultados das (in)equações de restrições foram inseridas na coluna “O”, nas células (O5:O9) e os pesos nas células \$O\$4;\$B\$3:\$N\$4. Dessa forma, mostram-se as janelas “Parâmetros do Solver” e Planilha Excel em que, nesta, pode-se identificar (em “O4”), o valor do escore de eficiência técnica da DMU₂ = 0,9932.

Procedeu-se da mesma forma para o cálculo dos escores de eficiência técnica das demais DMUs em análise. Apenas foram alterados os dados na formulação, de acordo com os valores de insumo e produto correspondentes a cada DMU objetivo.

Os procedimentos são semelhantes ao calcular a eficiência técnica das DMUs pelo modelo CCR, orientado a insumo, porém, não se considera a restrição (d) ($\lambda_1 + \dots + \lambda_{13} = 1$), do problema de programação linear (Planilha 3).

Planilha 3 - Dados da Tabela “A” e definições dos parâmetros do Solver para o Modelo DEA_CCR/Envoltório/RCE/ Orientado a insumo.

The screenshot displays the Microsoft Excel interface with the Solver Parameters dialog box open. The background spreadsheet (Planilha 3) contains data for 13 DMUs. The Solver dialog box is configured as follows:

- Definir Objeto:** Teta (FO)
- Para:** Máx. (Maximum)
- Alterando Células Variáveis:** \$Q\$4:\$Q\$4
- Sujeito às Restrições:**
 - \$R\$1:\$R\$4 >= \$R\$8
 - \$R\$5 >= \$R\$9
 - \$R\$6 <= \$R\$6
 - \$R\$7 <= \$R\$7
- Tornar Variáveis Irestritas Não Negativas
- Selecionar um Método de Solução:** LP Simplex

The spreadsheet data is summarized in the table below:

DMU	Output	Input1	Input2	Teta (FO)	Limites (para FO)
DMU1	7407	334102	410294	0	0
DMU2	9642	13687	17333	0	0
DMU12	17858	776377	33484	0	0
DMU13	12103	458871	21596	0,964693311	0,730399212

Na Planilha 3, mostra-se o *Solver* ativado para calcular o escore de eficiência técnica das 13 DMUs, com as expressões da programação linear nas caixas de comando, com base no Modelo DEA_CCR, orientação insumo.

APÊNDICE B - Questionário aplicado aos técnicos e, ou, produtores de cana para auxiliar na coleta complementar de dados das propriedades canavieiras da Serra dos Aimorés

Parte deste questionário foi aplicada quando das visitas, da autora, em janeiro de 2012 e fevereiro de 2013 e, parte, via correio eletrônico aos técnicos do Educampo-Cana e da Destilaria Serra dos Aimorés.

A) PERFIL DOS PRODUTORES DE CANA DA SERRA DOS AIMORÉS

1. Nome da Propriedade:
2. Município:
3. Proprietário:
 - 3.1 Sexo: Masc. (); Fem. ()
 - 3.2 Faixa etária (idade): _____
 - 3.3 Escolaridade:
 - 3.3.1 Fundamental: completo (); incompleto ()
 - 3.3.2 Médio: completo (); incompleto ()
 - 3.3.3 Universitário: completo (); incompleto ()
 - 3.3.4 Pós-Graduação: ()
4. Área de plantio: Própria (); Arrendada ()
5. Há quanto tempo é proprietário, arrendatário ou trabalha na propriedade?

() Menos de 2 anos; () Entre 2 e 5 anos; () Entre 6 e 10 anos; () Mais de 10 anos
6. O proprietário (arrendatário):
 - 6.1 Reside na fazenda? () Sim; () Não.
 - 6.2 Tem outra atividade remunerada? Sim (); Não ()
 - 6.3 A propriedade canavieira é a sua principal atividade? Sim (); Não ()
 - 6.4 Tem alguma aposentadoria: () Sim; () Não.
 - 6.5 Participa de cursos de treinamento? () Sim; () Não
 - 6.6 Cumpre o planejamento de atividades de implantação e condução do canalial sugerido pelos técnicos da DASA? () Sim; () Não; () Às vezes.

B) DADOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS

7. Valor do arrendamento do terreno:

R\$/ha		Em toneladas de cana	
--------	--	----------------------	--

8. Benfeitorias

Item	Descrição:

9. Distância da propriedade à destilaria:

Raio médio em km: _____

10. Mecanização no plantio e condução do canavial

Própria		Terceirizada	
		<i>Máq. pesada</i>	<i>Máq. média</i>
			<i>Máq. leve</i>
Horas máquina (h/m)			
Valor da h/m			

11. Mudanças de cana

Origem	Sim	Quantidade (t/ha)	Variedade
Viveiro primário (mudas de qualidade, principalmente sanitária, são tratadas termicamente ou obtidas de cultura de tecido)			
Viveiro secundário (mudas originárias de um viveiro primário)			
Viveiro (mudas não tratadas termicamente ou não obtidas de cultura de tecido).			

12. Recursos Humanos

Descrição	Horas Homem (h/H)	Valor da h/H
Celetistas		
Terceirizados		
Familiar		
Gerencial		
Total h/H		

13. Uso de vinhaça:

Sim		Não	
-----	--	-----	--

13.1 Taxa de aplicação de vinhaça (fertirrigação), em m³/ha: _____

13.2 Preço do m³: _____

13.3 Percentual da área fertirrigada: _____

13.4 Método usado: _____

13.5 A irrigação com aplicação de vinhaça é realizada

Durante o plantio		Após o corte da cana	
-------------------	--	----------------------	--

14. Na ÁREA DE PLANTIO, que percentagem corresponde à cana de ano e meio, e que percentagem corresponde à cana de ano?

Resposta:

15. Adubação da cana

15.1 Adubo químico

Durante o plantio		Após o corte da cana	
-------------------	--	----------------------	--

15.2 Adubo orgânico

Durante o plantio		Após o corte da cana	
-------------------	--	----------------------	--

16. Quantidades de fertilizante (N, P e K) normalmente utilizadas no plantio de cana

N	P	K

17. Quantidades de fertilizante N, P e K normalmente utilizadas nas rebrotas da cana

N	K

18. Quantidades de calcário e gesso normalmente utilizadas em áreas de reforma do canavial.

Resposta:

19. Quando é realizada eliminação química das rebrotas, qual é o produto normalmente utilizado e qual é sua dosagem em kg/ha?

Resposta:

20. Do total de defensivos agrícolas utilizados (inseticidas e herbicidas) que percentagem destina-se à eliminação química das rebrotas, para combate a pragas e doenças e para o combate a ervas daninhas?

Defensivos agrícolas	Dosagem	%
Eliminação química das rebrotas		
Combate às pragas e doenças		
Combate às ervas daninhas		

21. Colheita da cana

Tipo de colheita	Sim	%
Com queima		
Sem queima		
Manual		
Mecanizado		

22. Corte, carregamento e transporte da cana (CCT)

Serviço	Sim	Hora	Valor do corte, carregamento e transporte (CCT) em R\$		
			Corte	Carregamento	Transporte
Terceirizado					

23. Uso de adubos verdes

Espécie	Época	Quantidade

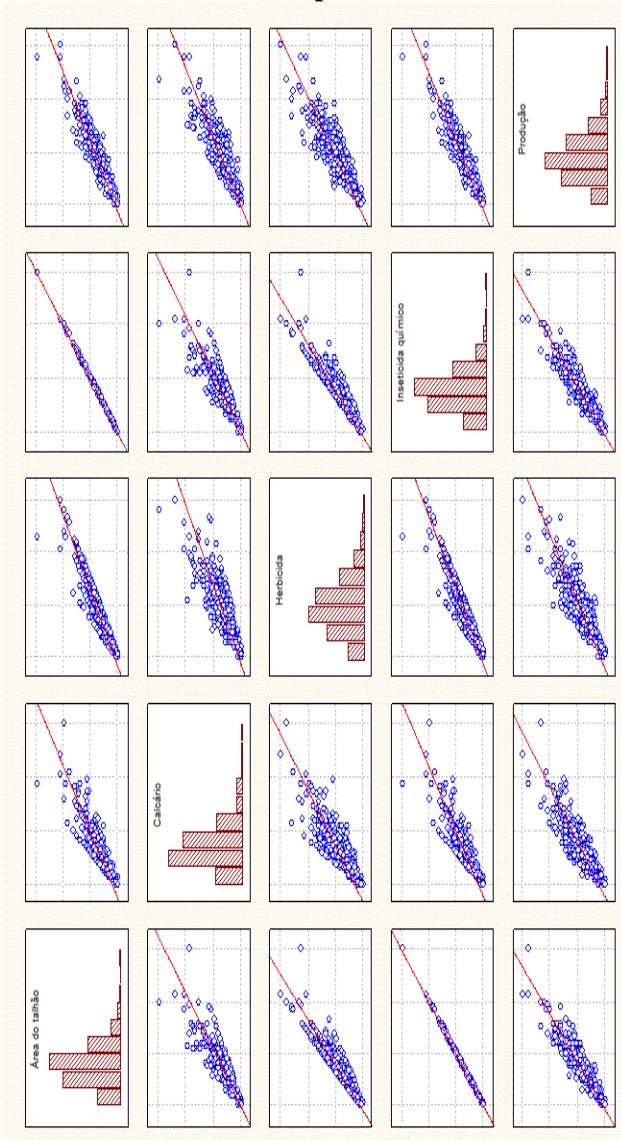
24. Produtividade média do canavial por ciclo (t/ha)

Cana-planta	
Primeira rebrota	
Segunda rebrota	
Terceira rebrota	
Quarta rebrota	
Quinta rebrota	
Sexta rebrota	

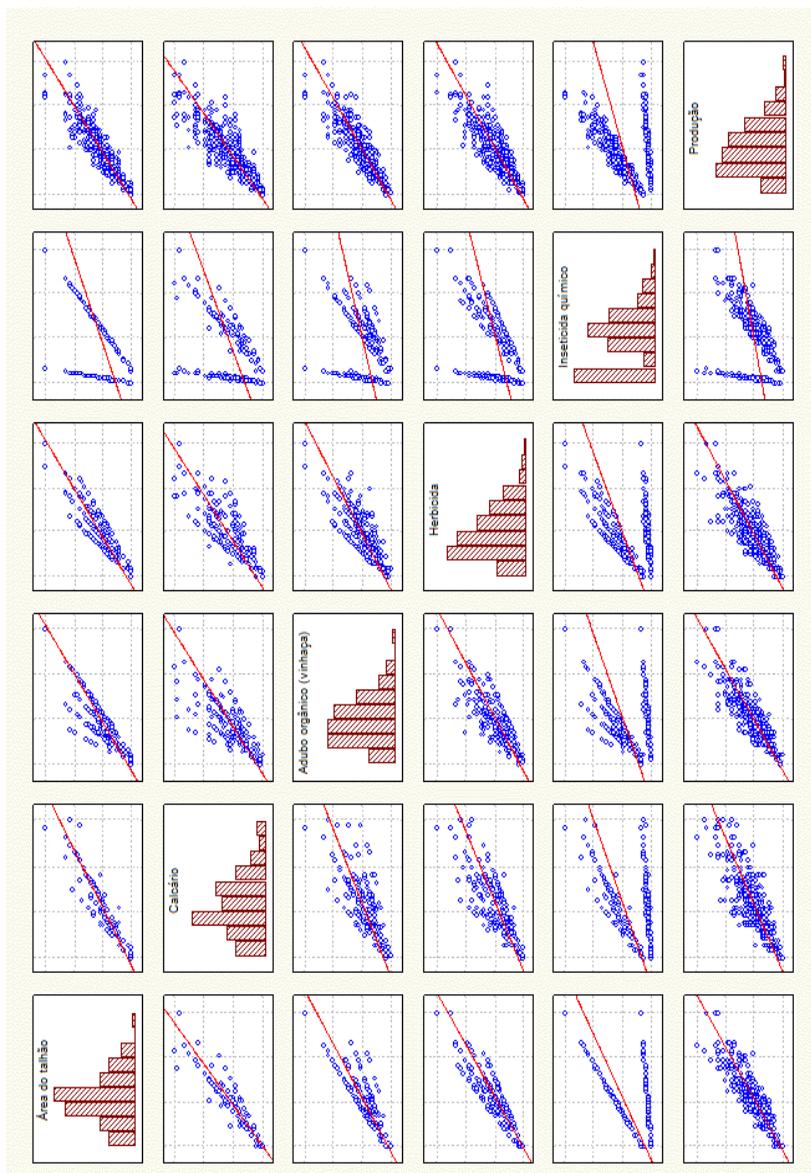
Preço da tonelada de cana: R\$.....

APÊNDICE C – Gráficos de dispersão das variáveis de *input* e *output* referentes à cana-planta e rebrotas da cana

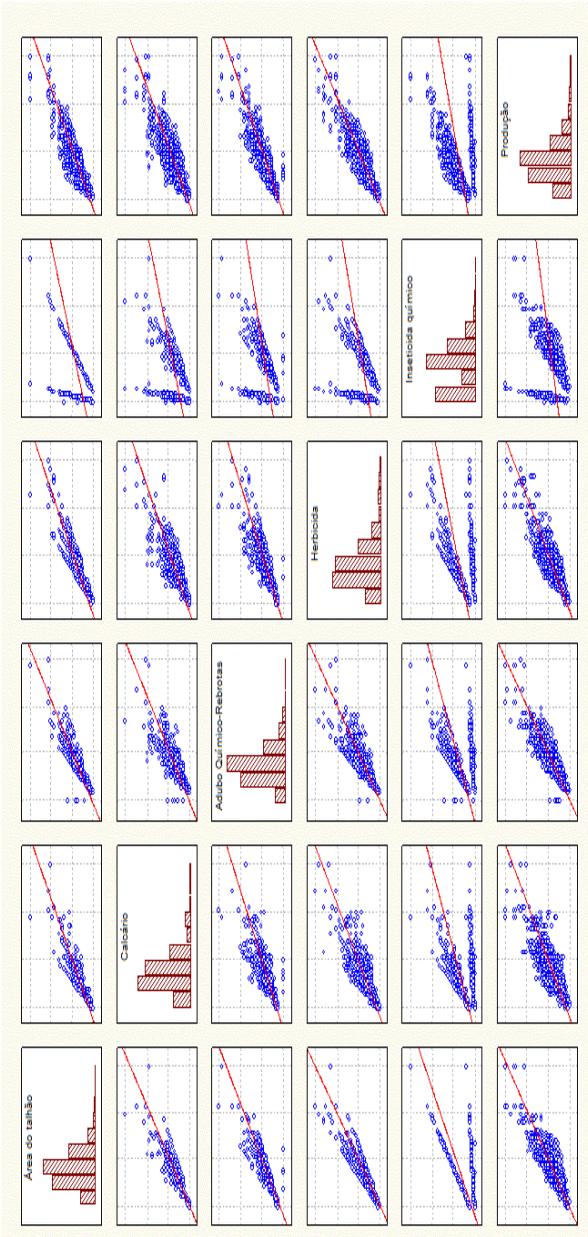
Cana-planta



Rebrotas – sem Vinhaça



Rebrotas – com Vinhaça



APÊNDICE D – Resultantes das análises de correlação e dos componentes principais (principal component analysis – PCA) das variáveis de *input* e *output* referentes à cana-planta e rebrotas da cana

Correlação (todas as variáveis) - Cana-planta

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Área do talhão	Calcário	Adubo Químico-Cana Planta	Mudas de Cana	Herbicida	Inseticida Químico	Inseticida Biológico	Mecanização	RH (Condição)	RH (CC)	RH (T)	RH (Total)	Produção
Área do talhão	5,87	2,26	1.000	0,869	0,977	0,978	0,909	1,000	1,000	1,000	0,998	0,924	0,589	0,940	0,924
Calcário	3,32	1,51	0,869	1,000	0,868	0,860	0,804	0,869	0,869	0,869	0,865	0,871	0,630	0,883	0,871
Adubo Químico-Cana Planta	0,62	0,25	0,977	0,868	1,000	0,963	0,894	0,977	0,977	0,977	0,975	0,958	0,613	0,951	0,958
Mudas de Cana	14,86	5,88	0,978	0,860	0,963	1,000	0,899	0,978	0,978	0,978	0,975	0,917	0,592	0,932	0,917
Herbicida	17,88	7,44	0,909	0,804	0,894	0,899	1,000	0,909	0,909	0,909	0,906	0,847	0,528	0,860	0,847
Inseticida Químico	0,73	0,28	1,000	0,869	0,977	0,978	0,909	1,000	1,000	1,000	0,998	0,924	0,589	0,940	0,924
Inseticida Biológico	17,61	6,77	0,869	0,869	0,977	0,978	0,909	1,000	1,000	1,000	0,998	0,924	0,589	0,940	0,924
Mecanização	12,33	4,74	1,000	0,869	0,977	0,978	0,909	1,000	1,000	1,000	0,998	0,924	0,589	0,940	0,924
RH (Condição)	137,56	53,07	0,998	0,865	0,975	0,975	0,906	0,998	0,998	0,998	1,000	0,920	0,587	0,937	0,920
RH (CC)	90,604	37,071	0,924	0,871	0,938	0,917	0,847	0,924	0,924	0,924	0,920	1,000	0,619	0,997	1,000
RH (T)	40,42	33,62	0,589	0,630	0,613	0,592	0,528	0,589	0,589	0,589	0,587	0,619	1,000	0,666	0,619
RH (Total)	1084,02	441,72	0,940	0,883	0,951	0,932	0,860	0,940	0,940	0,940	0,937	0,997	0,666	1,000	0,937
Produção	641,07	262,30	0,924	0,871	0,938	0,917	0,847	0,924	0,924	0,924	0,920	1,000	0,619	0,997	1,000

Correlação I-O - Cana-planta

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Área do talhão	Calcário	Herbicida	Inseticida Químico	Produção
Área do talhão	5,87	2,26	1,000	0,869	0,909	1,000	0,924
Calcário	3,32	1,51	0,869	1,000	0,804	0,869	0,871
Herbicida	17,88	7,44	0,909	0,804	1,000	0,909	0,847
Inseticida Químico	0,73	0,28	1,000	0,869	0,909	1,000	0,924
Produção	641,07	262,30	0,924	0,871	0,847	0,924	1,000

PCA - Cana-planta

Variáveis	Componente 1	Componente 2	R ² (Cumul.)	Eigenvalues	Q ²	Limit	Q ² (Cumul.)	Significance	Iterations
Área do talhão	0,984281	-0,080711	0,914587	4,572934	0,863332	0,202005	0,863332	S	3
Calcário	0,921680	0,344552	0,956665	0,210392	0,102110	0,251884	0,877287	NS	9
Herbicida	0,934567	-0,264642							
Inseticida químico	0,984281	-0,080711							
Produção	0,955200	0,092801							

Correlação (todas as variáveis) - Com vinhaça

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Área do Talhão	Calciário	Adubo Químico-Cana Planta	Adubo Orgânico (Vinhaça)	Mudas de Cana	Herbicida	Inseticida Químico	Inseticida Biológico	Mecanização	RH (Condição)	RH (Corte e Carregamento)	RH (Transporte)	RH (Total)	Produção
Área do Talhão	5,51	2,16	1,000	0,916	0,973	0,864	0,979	0,885	0,602	1,000	1,000	0,998	0,893	0,471	0,922	0,893
Calciário	3,02	1,35	0,916	1,000	0,892	0,760	0,886	0,788	0,551	0,916	0,916	0,919	0,836	0,464	0,861	0,836
Adubo Químico-Cana Planta	0,59	0,24	0,973	0,892	1,000	0,881	0,951	0,890	0,585	0,973	0,973	0,973	0,884	0,430	0,909	0,884
Adubo Orgânico (Vinhaça)	232,88	109,32	0,864	0,760	0,881	1,000	0,832	0,806	0,433	0,864	0,864	0,864	0,870	0,538	0,883	0,870
Mudas de Cana	13,81	5,55	0,979	0,886	0,951	0,832	1,000	0,895	0,589	0,979	0,979	0,976	0,881	0,446	0,908	0,881
Herbicida	14,12	6,51	0,885	0,788	0,890	0,806	0,895	1,000	0,465	0,885	0,885	0,887	0,835	0,330	0,852	0,835
Inseticida Químico	4,30	2,81	0,602	0,551	0,585	0,433	0,589	0,465	1,000	0,602	0,602	0,600	0,344	0,177	0,391	0,344
Inseticida Biológico	16,52	6,49	1,000	0,916	0,973	0,864	0,979	0,885	0,602	1,000	1,000	0,998	0,893	0,471	0,922	0,893
Mecanização	17,07	6,71	1,000	0,916	0,973	0,864	0,979	0,885	0,602	1,000	1,000	0,998	0,893	0,471	0,922	0,893
RH (Condição)	134,97	53,52	0,998	0,919	0,973	0,864	0,976	0,887	0,600	0,998	0,998	1,000	0,890	0,460	0,920	0,890
RH (Corte e Carregamento)	606,02	269,87	0,893	0,836	0,884	0,870	0,881	0,835	0,344	0,893	0,893	0,890	1,000	0,597	0,997	1,000
RH (Transporte)	11,72	9,08	0,471	0,464	0,430	0,538	0,446	0,330	0,177	0,471	0,471	0,460	0,597	1,000	0,601	0,597
RH (Total)	752,72	323,63	0,922	0,861	0,909	0,883	0,908	0,852	0,391	0,922	0,922	0,920	0,997	0,601	1,000	0,997
Produção	428,79	190,94	0,893	0,836	0,884	0,870	0,881	0,835	0,344	0,893	0,893	0,890	1,000	0,597	0,997	1,000

Correlação I-O - Com vinhaça

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Área do Talhão	Calciário	Adubo Orgânico (Vinhaça)	Herbicida	Inseticida Químico	Produção
Área do Talhão	5,51	2,16	1,000	0,916	0,864	0,885	0,602	0,893
Calciário	3,02	1,35	0,916	1,000	0,760	0,788	0,551	0,836
Adubo Orgânico (Vinhaça)	232,88	109,32	0,864	0,760	1,000	0,806	0,433	0,870
Herbicida	14,12	6,51	0,885	0,788	0,806	1,000	0,465	0,835
Inseticida Químico	4,30	2,81	0,602	0,551	0,433	0,465	1,000	0,344
Produção	428,79	190,94	0,893	0,836	0,870	0,835	0,344	1,000

PCA - Com vinhaça

Componente	R ² X	R ² X(Cumul.)	Eigenvalues	Q ²	Limit	Q ² (Cumul.)	Significance	Iterations
1	0.782606	0.782606	4.695635	0.706492	0.168755	0.706492	S	3
2	0.125142	0.907748	0.750851	0.295656	0.202010	0.793269	S	4

Variáveis	Componente 1	Componente 2
Área do talhão	0.981894	0.022353
Calciário	0.924208	0.030422
Adubo orgânico (vinhaça)	0.907176	-0.175196
Herbicida	0.914512	-0.110792
Inseticida químico	0.606507	0.788927
Produção	0.922724	-0.289915

Correlação (todas as variáveis) - Sem Vinhaça

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Área do Talhão	Calciário	Adubo Químico-Cana Planta	Adubo Químico-Rebrotas	Mudas de Cana	Herbicida	Inseticida Químico	Inseticida Biológico	Mecani-zação	RH (Condução)	RH (Corte e Carrega-mento)	RH (Trans-porte)	RH (Total)	Produção
Área do Talhão	5.99	2.27	1.000	0.855	0.879	0.879	0.977	0.880	0.588	1.000	0.998	0.873	0.632	0.902	0.873	
Calciário	3.42	1.54	0.855	1.000	0.862	0.784	0.851	0.795	0.504	0.855	0.855	0.849	0.816	0.654	0.836	
Adubo Químico-Cana Planta	0.63	0.25	0.979	0.862	1.000	0.895	0.966	0.879	0.575	0.979	0.979	0.975	0.886	0.670	0.912	
Adubo Químico-Rebrotas	1.85	0.86	0.879	0.784	0.895	1.000	0.884	0.830	0.450	0.879	0.879	0.874	0.877	0.712	0.893	
Mudas de Cana	15.21	5.94	0.977	0.851	0.966	0.884	1.000	0.881	0.574	0.977	0.977	0.974	0.883	0.639	0.908	
Herbicida	15.06	6.79	0.880	0.795	0.879	0.830	0.881	1.000	0.397	0.880	0.880	0.877	0.873	0.634	0.884	
Inseticida Químico	4.66	3.02	0.588	0.504	0.575	0.450	0.574	0.397	1.000	0.588	0.588	0.588	0.335	0.277	0.379	
Inseticida Biológico	17.97	6.82	1.000	0.855	0.979	0.879	0.977	0.880	0.588	1.000	1.000	0.998	0.873	0.632	0.902	
Mecanização	18.57	7.05	0.998	0.855	0.979	0.879	0.977	0.880	0.588	1.000	1.000	0.998	0.873	0.632	0.902	
RH (Condução)	146.22	55.60	0.998	0.849	0.975	0.874	0.974	0.877	0.588	0.998	0.998	1.000	0.871	0.635	0.901	
RH (Corte e Carregamento)	668.34	302.83	0.873	0.816	0.886	0.877	0.883	0.873	0.335	0.873	0.873	0.871	1.000	0.770	0.997	
RH (Transporte)	35.96	28.05	0.632	0.654	0.670	0.712	0.639	0.634	0.277	0.632	0.632	0.635	0.770	1.000	0.997	
RH (Total)	850.52	374.11	0.902	0.836	0.912	0.893	0.908	0.884	0.379	0.902	0.902	0.901	0.997	0.793	1.000	
Produção	472.88	214.27	0.873	0.816	0.866	0.877	0.883	0.873	0.335	0.873	0.873	0.871	1.000	0.770	0.997	

Correlação I-O - Sem vinhaça

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Área do Talhão	Calcário	Adubo Químico-Rebrotas	Herbicida	Inseticida Químico	Produção
Área do Talhão	5,99	2,27	1,000	0,855	0,879	0,880	0,588	0,873
Calcário	3,42	1,54	0,855	1,000	0,784	0,795	0,504	0,816
Adubo Químico-Rebrotas	1,85	0,86	0,879	0,784	1,000	0,830	0,450	0,877
Herbicida	15,06	6,79	0,880	0,795	0,830	1,000	0,397	0,873
Inseticida Químico	4,66	3,02	0,588	0,504	0,450	0,397	1,000	0,335
Produção	472,88	214,27	0,873	0,816	0,877	0,873	0,335	1,000

PCA - Sem vinhaça

Variáveis	Componente 1	Componente 2
Área do talhão	0,968419	0,048048
Calcário	0,909000	0,002436
Adubo Químico-Rebrotas	0,928165	-0,110645
Herbicida	0,922799	-0,179796
Inseticida químico	0,575807	0,811027
Produção	0,927339	-0,266491

Componente	R ² X	R ² X(Cumul.)	Eigenvalues	Q ²	Limit	Q ² (Cumul.)	Significance	Iterations
1	0,778113	0,778113	4,668677	0,703909	0,167362	0,703909	S	3
2	0,129278	0,907391	0,775666	0,294401	0,200668	0,791078	S	3

APÊNDICE E – Análise de Regressão Linear do Grupos 1 – 20 Fazendas

Variável dependente: variação do lucro
Variável independente: IPTF

```

----- (R)
----- 12.0 Copyright 1985-2011 StataCorp LP
----- Statistics/Data Analysis StataCorp
----- Special Edition 4905 Lakeway Drive
----- College Station, Texas 77845 USA
----- 800-STATA-PC http://www.stata.com
----- 979-696-4600 stata@stata.com
----- 979-696-4601 (fax)
    
```

Single-user Stata network perpetual license:
 Serial number: 93611859953
 Licensed to: Terezinha
 SAMAR - 0333-5120560

Notes:

1. (/v# option or -set maxvar-) 5000 maximum variables

```

. import excel "C:\Users\Terezinha\2-Anos 2010-2012\Documents\20Faz_VariaçãoLucro_IPTF_Stata.xlsx"
> , sheet("20Faz-IPTF e variação do lucro") firstrow
    
```

```

. twoway (scatter VariaoadoLucro IPTF)
    
```

```

. regress VariaoadoLucro IPTF
    
```

Source	SS	df	MS	Number of obs =	300
Model	1748734.96	1	1748734.96	F(1, 298) =	30.85
Residual	16890139.8	298	56678.3216	Prob > F =	0.0000
				R-squared =	0.0938
				Adj R-squared =	0.0908
Total	18638874.8	299	62337.3739	Root MSE =	238.07

VariaoadoLu-o	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
IPTF	257.8417	46.41941	5.55	0.000	166.4903 349.1931
_cons	-395.0999	36.73461	-10.76	0.000	-467.392 -322.8078

```

. save "C:\Users\Terezinha\2-Anos 2010-2012\Desktop\20Faz_RegressãoLinear.dta"
file C:\Users\Terezinha\2-Anos 2010-2012\Desktop\20Faz_RegressãoLinear.dta saved
    
```

APÊNDICE F – Análise de Regressão Linear do Grupos 2 – 59 Fazendas

Variável dependente: variação do lucro
Variável independente: IPTF

 (R)
 Statistics/Data Analysis
Special Edition

12.0 Copyright 1985-2011 StataCorp LP
 StataCorp
 4905 Lakeway Drive
 College Station, Texas 77845 USA
 800-STATA-PC <http://www.stata.com>
 979-696-4600 stata@stata.com
 979-696-4601 (fax)

Single-user Stata network perpetual license:

Serial number: 93611859953
 Licensed to: Terezinha
 SAMAR - 0333-5120560

Notes:

1. (/v# option or -set maxvar-) 5000 maximum variables

```
. import excel "C:\Users\Terezinha\2-Anos 2010-2012\Documents\20Faz-VariacaoLucro-IPTF_Stata.xlsx"
> , sheet("20Faz-IPTF e variação do lucro") firstrow
```

```
. regress VariaoDoLucro IPTF
```

Source	SS	df	MS			
Model	1748734.96	1	1748734.96	Number of obs =	300	
Residual	16890139.8	298	56678.3216	F(1, 298) =	30.85	
				Prob > F =	0.0000	
				R-squared =	0.0938	
				Adj R-squared =	0.0908	
Total	18638874.8	299	62337.3739	Root MSE =	238.07	

VariaoDoLu-o	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
IPTF	257.8417	46.41941	5.55	0.000	166.4903	349.1931
_cons	-395.0999	36.73461	-10.76	0.000	-467.392	-322.8078